



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**NÁVRH VODIVÉHO SILIKÁTOVÉHO KOMPOZITU
PRO VYHŘÍVÁNÍ**

PROPOSITION OF CONDUCTIVE SILICATE COMPOSITE FOR HEATING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jana Surovcová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc.,
MBA, dr.h.c.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jana Surovcová
Název	Návrh vodivého silikátového kompozitu pro vyhřívání
Vedoucí práce	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr.h.c.
Datum zadání	30. 11. 2020
Datum odevzdání	28. 5. 2021

V Brně dne 30. 11. 2020

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,
dr.h.c.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

1. Li H.; Zhang Q.; Xiao H. Self-deicing road system with a CNFP high-efficiency thermal source and MWCNT/cement-based high-thermal conductive composites, 2013, Cold Regions Science and Technology, 86, pp. 22-35, DOI: 10.1016/j.coldregions.2012.10.007
2. Shishegaran A.; Daneshpajoh F.; Taghavizade, H.; Mirvalad S. Developing conductive concrete containing wire rope and steel powder wastes for route deicing, 2020, Construction and Building Materials, 232, art. no. 117184, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117184
3. Sassani A.; Ceylan H.; Kim, S.; Arabzadeh A.; Taylor P.C.; Gopalakrishnan K. Development of Carbon Fiber-modified Electrically Conductive Concrete for Implementation in Des Moines International Airport, 2018 Case Studies in Construction Materials, 8, pp. 277-291. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.02.003
4. Rao R.; Fu J.; Chan Y.; Tuan C.Y.; Liu, C. Steel fiber confined graphite concrete for pavement deicing, 2018, Composites Part B: Engineering, 155, pp. 187-196., DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.08.013
5. Wu J.; Liu J.; Yang F.; Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing, 2015, Construction and Building Materials, 75, pp. 129-135. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.004
6. ČSN EN 62561-7 Součásti systému ochrany před bleskem (LPSC) - Část 7: Požadavky na směsi zlepšující uzemnění
7. Výzkumné zprávy a protokoly ústavu THD, příspěvky ze sborníků konferencí, odborné články, časopisy, normy.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V rámci řešení bakalářské práce bude na základě rešerše odborné literatury navržena vhodná receptura vodivého silikátového kompozitu, který bude možné vyhřívat působením elektrického proudu. Požadovaných parametrů navrhovaného materiálu bude dosaženo zejména prostřednictvím výběru vhodných elektricky vodivých plniv z širokého spektra uvažovaných materiálů. Důraz bude kladen na využití druhotných surovin, čímž dojde ke snížení dopadu případné výroby na životní prostředí.

1. Zhodnoťte současný stav poznání v oblasti elektricky vodivých silikátových a vyhřívaných stavebních materiálů používaných v praxi.
2. Formulujte požadavky na mechanicko-fyzikální parametry, které budou nově vyvinuté kompozitní materiály muset splňovat.
3. Navrhněte vhodná pojiva pro výrobu silikátových kompozitních směsí pro elektrické vyhřívání.
4. Zhodnoťte široké spektrum vodivých plniv, a to zejména s důrazem na využití druhotných surovin, pro nové hmoty a navrhněte vhodné typy.
5. Navrhněte výsledné receptury vodivého silikátového kompozitu pro vyhřívání, vyberte optimální a tu experimentálně ověřte.

Předpokládaný rozsah bakalářské práce je 40-50 stran.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava,

odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,
dr.h.c.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá vývojom elektricky vodivého silikátového kompozitu so schopnosťou výhrevnosti navrhovaného pre plochy v exteriéri, na ktorých sa môže v zimnom období vytvárať ľadová vrstva. Vyvíjaný silikátový kompozit by mal nahradiť rozmrazovanie povrchov chemickými rozmrazovacími látkami, ktoré môžu mať nepriaznivý dopad na životné prostredie a pri náhlych zmenách počasia bývajú aplikované s oneskorením. V teoretickej časti práce je zhrnutá teória vzniku elektrického poľa a vedenia elektrického prúdu, priblížená problematika silikátových spojív, rôznych druhov elektricky vodivých fáz a predstavený súčasný stav poznania v oblasti výskumu vyhrievaných kompozitov. Praktická časť obsahuje posúdenie vybraných vplyvov expozičného prostredia, na základe ktorých sú potom formulované požiadavky na vyvíjaný kompozit. Ďalej sa praktická časť venuje analýze vhodných surovín pre zhotovenie vyhrievaného kompozitu, so zameraním na vodivé plnivá. Zvolené plnivá s nízkou hodnotou impedancie sú následne použité v navrhovaných receptúrach a výrobe skúšobných telies pre komparáciu reálne dosiahnutých a požadovaných parametrov. V práci sa podarilo dokázať schopnosť výhrevnosti silikátového kompozitu s vodivým plnivom pomocou elektrického prúdu, avšak požadované mechanické parametre neboli dosiahnuté. Bakalárska práca slúži ako vhodný podklad pre pokračovanie výskumu v oblasti problematiky elektricky vodivých vyhrievaných silikátových kompozitov.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

vyhrievaný kompozit, elektricky vodivý kompozit, silikátový kompozit, grafitový prach, odpadný grafitový prach, impedancia

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with the development of electrically conductive silicate composite with the self heating value designed for surfaces in the exterior, on which an ice layer can form during the winter. The developed silicate composite should replace the defrosting of surfaces with chemical defrosting substances, which could have an adverse impact on the environment and are usually applied with a delay when a sudden change of weather appears. The theoretical part of this thesis summarizes the theory of electric field and electric current conduction, approached the issue of silicate binders, various types of electrically conductive phases and presents the current state of knowledge in the field of research of self heated composites. The practical part contains an assessment of selected effects of the exposure environment, based on which the requirements for the developed composite are formulated. Furthermore, the practical part is devoted to the analysis of necessary materials for producing self heated composite, so the focus is on conductive fillers. Selected fillers with the low level of the impedance are then used in the proposed recipes and the production of test specimens for the comparison of real parameters and the required ones. The work succeeded in proving the ability of heating the silicate composite with a conductive filler by means of an electric current, while the required mechanical parameters were not achieved. The bachelor thesis serves as a suitable basis for further research linked to the issue of electrically conductive self heated silicate composites.

KEYWORDS

self heated composite, self heating composite, electrically conductive composite, silicate composite, graphite powder, waste graphite powder, impedance

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

SUROVCOVÁ, Jana. *Návrh vodivého silikátového kompozitu pro vyhřívání*. Brno, 2021. 92 s. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedúci práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr.h.c.

PREHLÁSENIE O ZHODE LISTINNEJ A ELEKTRONICKEJ FORMY ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Prehlasujem, že elektronická forma odovzdanej bakalárskej práce s názvom *Návrh vodivého silikátového kompozitu pro vyhřívání* je zhodná s odovzdanou listinnou formou.

V Brne dňa 28.5. 2021

Jana Surovcová
autor práce

PREHLÁSENIE O PÔVODNOSTI ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu *Návrh vodivého silikátového kompozitu pro vyhřívání* spracovala samostatne a že som uviedla všetky použité informačné zdroje.

V Brne dňa 28.5. 2021

Jana Surovcová
autor práce

POĎAKOVANIE

Týmto by som veľmi rada poďakovala vedúcemu práce prof. Ing. Rostislavovi Drochytškovi, CSc., MBA, dr.h.c. za jeho cenné odborné rady, myšlienky a pripomienky, ktoré mi výrazne pomohli k napísaniu tejto práce a dosiahnutiu cieľa. Rovnako moja veľká vďaka patrí Ing. Jindřichu Melicharovi, Ph.D. za pomoc, trpezlivosť, odborné vedenie a ústretový prístup pri spracovávaní práce. Taktiež ďakujem doc. Ing. Pavlovi Šteffanovi, Ph.D. z Fakulty elektrotechniky za pomoc pri meraní výhrevnosti a veľmi zaujímavé informácie ohľadom elektrotechniky, ktoré mi neváhal poskytnúť. V neposlednom rade tiež ďakujem priateľom a rodine za podporu počas celého štúdia.

OBSAH

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK.....	12
ÚVOD.....	14
TEORETICKÁ ČASŤ	15
1 TEÓRIA ELEKTRICKEJ VODIVOSTI.....	15
1.1 Elektrický náboj.....	15
1.2 Rozdelenie látok podľa elektrickej vodivosti.....	16
1.2.1 Vodiče	16
1.2.2 Polovodiče	16
1.2.3 Izolanty.....	18
1.3 Elektrostatické pole	19
1.3.1 Vodič v elektrostatickom poli	19
1.3.2 Dielektrikum v elektrostatickom poli	20
1.4 Elektrodynamika	20
1.4.1 Elektrický prúd	21
2 SILIKÁTY A SILIKÁTOVÉ SPOJIVÁ	26
2.1 Spojivá a ich charakteristika	26
2.1.1 Hydraulické spojivá	27
2.1.2 Cementy.....	28
3 VODIVÉ FÁZY V KOMPOZITOCH	30
3.1 Kompozit.....	30
3.2 Elektricky a tepelne vodivé disperzie	30
3.2.1 Vodivé fázy vlákňitého charakteru	30
3.2.2 Vodivé fázy časticového charakteru	34
4 SÚČASNÝ STAV POZNANIA V OBLASTI VYHRIEVANÝCH SILIKÁTOVÝCH KOMPOZITOV	36
PRAKTICKÁ ČASŤ	39
5 CIEĽ PRÁCE	39
6 METODIKA PRÁCE.....	40
7 ETAPA I: FORMULÁCIA APLIKAČNÝCH PROSTREDÍ A POŽADOVANÝCH PARAMETROV VYVÍJANÝCH HMÔT.....	44
7.1 Charakteristika prostredia aplikácie kompozitu pre vyhrievanie.....	44
7.1.1 Vplyv vlhkosti	44
7.1.2 Namáhanie zmenami teplôt	44
7.1.3 Mrazové pôsobenie vody	45
7.1.4 Dynamické zaťaženie	45
7.1.5 Vylúhovateľnosť podľa ČSN EN 12457-2.....	45
7.2 Požiadavky na parametre navrhovaného kompozitu pre vyhrievanie	46

7.2.1	Elektricky vodivostné vlastnosti.....	47
7.2.2	Mechanické a deformačné vlastnosti	47
7.3	Zhrnutie Etapy I	50
8	ETAPA II: ANALÝZA VSTUPNÝCH SUROVÍN PRE NÁVRH SILIKÁTOVÉHO	
	KOMPOZITU PRE VYHRIEVANIE.....	51
8.1	Spojivá	51
8.1.1	Portlandský cement CEM I 42,5 R.....	51
8.1.2	Vysokoteplotný popolček	52
8.2	Plnivá.....	53
8.2.1	Referenčné plnivo – Kremičitý piesok	53
8.2.2	Primárne vodivé plnivá	54
8.2.3	Druhotné vodivé plnivá	56
8.3	Analýzy vlastností ovplyvňujúcich elektrickú vodivosť	61
8.3.1	TOC (Total organic carbon) - Celkový obsah organického uhlíka	61
8.3.2	Vlastná impedancia vodivých plnív	62
8.4	Posúdenie kompatibility surovín	63
8.5	Zhrnutie Etapy II	64
9	ETAPA III: VOĽBA MATERIÁLOVÉHO ZLOŽENIA PRE PRÍPRAVU	
	SILIKÁTOVÉHO KOMPOZITU PRE VYHRIEVANIE	66
9.1	Návrh receptúr	66
9.1.1	Receptúra REF	66
9.1.2	Receptúra CON	67
9.1.3	Receptúra VYS	68
9.1.4	Receptúra PEK	68
9.2	Zhotovenie skúšobných telies silikátového kompozitu pre vyhrievanie	69
9.3	Zhrnutie Etapy III	70
10	ETAPA IV: EXPERIMENTÁLNE OVERENIE POŽADOVANÝCH VLASTNOSTÍ	
	SILIKÁTOVÉHO KOMPOZITU PRE VYHRIEVANIE	71
10.1	Stanovenie rezistivity podľa ČSN EN 62561-7	71
10.2	Metodika stanovenia výhrevnosti telies	72
10.3	Namerané a vypočítané hodnoty.....	73
10.4	Záznamy z merania výhrevnosti	77
10.5	Vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov.....	80
	ZÁVER	82
	BIBLIOGRAFIA.....	84
	ZOZNAM OBRÁZKOV	89
	ZOZNAM TABULIEK.....	91
	ZOZNAM GRAFOV	92

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

c	[m/s]	rýchlosť svetla
F	[N]	sila
k	[N·m ² /C ²]	konštanta úmernosti
Q	[C]	elektrický náboj
r	[m]	polomer
ε_0	[F/m]	permitivita vákua
E	[V/m]	intenzita elektrického poľa
V	[V]	elektrický potenciál
I	[A]	elektrický prúd
t	[s]	čas
S	[m ²]	prierezová plocha
v	[m/s]	rýchlosť
U	[V]	napätie
R	[Ω]	rezistancia (elektrický odpor)
G	[S]	elektrická vodivosť
ρ	[$\Omega \cdot m$] / [$\Omega \cdot cm$]	rezistivita (merný elektrický odpor)
l	[m]	dĺžka
L	[H]	indukčnosť
C	[F]	kapacita kondenzátora
ω	[rad/s]	uhlová rýchlosť
f	[Hz]	frekvencia
φ	[rad]	uhol fázového posunu
Z	[Ω]	impedancia
X_L	[Ω]	induktancia
X_C	[Ω]	kapacitancia
CF		uhlíkové vlákna
PAN		polyakrylonitril
CNF		uhlíkové nanovlákná
CNT		uhlíkové nanotrubičky
SWCNT		uhlíkové nanotrubičky s jednou stenou
DWCNT		uhlíkové nanotrubičky s dvomi stenami
MWCNT		uhlíkové nanotrubičky s viacerými stenami
SF		oceľové vlákna
CB		uhlíkové sadze
GP		grafitový prach
GO		oxid grafénu
R_f	[MPa]	pevnosť v ťahu za ohybu
F_f	[N]	sila pri ťahovom porušení
b	[mm]	šírka
h	[mm]	výška
R_c	[MPa]	pevnosť v tlaku
F_c	[N]	sila pri tlakovom porušení
$\varepsilon_{s,n}$	[%]	zmraštenie
z_n	[mm]	dĺžka základne v n-tý deň merania
z	[mm]	dĺžka základne nazačiatku merania
Δz_n	[mm]	dĺžková zmena základne oproti počiatku
TOC		celkový obsah organického uhlíka
OC		organický uhlík
IC		minerálny uhlík
PETG		polyethylene terephthalate glycol

CEM		cement pre bežné použitie
CEN		normová forma piesku
REF		referenčná receptúra
CON		receptúra s prídavkom grafitu Condufit C4
VYS		receptúra s prídavkom grafitu „vysávač“
PEK		receptúra s prídavkom petrolejového koksu
A	[m ²] / [cm ²]	prierezová plocha
a	[m]]/ [cm]	vzdialenosť elektród
P	[W]	činný výkon jednosmerného prúdu
m	[kg]	hmotnosť
OH	[kg/m ³]	objemová hmotnosť
Ø		priemerná hodnota
t _{max}	[°C]	maximálna dosiahnutá teplota

ÚVOD

Elektricky vodivé silikátové kompozity sú novodobým spojením rokmi získaných poznatkov v oblasti silikátových hmôt a trendu modernizácie a automatizácie v oblasti priemyslu. Elektricky vyhrievané kompozity sú pomerne inovatívnym pohľadom na účinky, ktoré spôsobuje prechod elektrického prúdu hmotným prostredím. Oblasť vývoja vyhrievaných kompozitov sa sústreďuje najmä na ich potenciál odľahčiť životné prostredie od chemických rozmrazovacích látok a znížiť prácnosť pri údržbe povrchov dopravných alebo úžitkových plôch počas zimného obdobia. V odbore stavebníctva je preto tento materiál veľmi ambicióznou záležitosťou so širokým spektrom aplikácií. Treba si však uvedomiť, že pre jeho využitie v praxi musí materiál spĺňať mnoho kritérií, ktoré zahŕňajú predovšetkým ekonomicky výhodnú prevádzku, bezpečnosť a stabilitu vlastností v čase. Práve týmito kritériami sa zaoberá súčasný svetový výskum s tematikou vyhrievaných kompozitov.

Táto bakalárska práca je zameraná na vývoj vyhrievaného elektricky vodivého kompozitu na silikátovej báze, a to najmä s dôrazom na využitie druhotných materiálov v podobe vodivej fáze zabezpečujúcej zníženie elektrického odporu. S nárastom produkcie priemyselne vyrábaných materiálov totiž vzniká množstvo odpadu, ktorého deponovanie výrazne obmedzuje súčasná legislatíva. V súvislosti s týmito skutočnosťami prirodzene narastá dopyt po využití takto vzniknutých odpadov v podobe druhotných surovín alebo ich recyklácii, ktorá býva mnohokrát zložitá a ekonomicky náročná. Zakomponovanie druhotných surovín ale pochopiteľne nesmie byť vykonané na úkor kvality výsledného kompozitu. Výber surovín vhodných vlastností je preto kľúčovou záležitosťou vedúcou k úspechu, ekologickej a udržateľnej podobe stavebníctva.

TEORETICKÁ ČASŤ

1 TEÓRIA ELEKTRICKEJ VODIVOSTI

Teória elektrickej vodivosti zahŕňa mnohé definície, poznatky a zákony, ktoré sú overené na experimentálnych úrovniach. S elektrickým nábojom je spojená elektrická vodivosť a tiež zákonitosti javov v elektrostatickom a elektrodynamickom poli. [1]

1.1 Elektrický náboj

Elektrický náboj v látkach je charakteristikou niektorých elementárnych častíc ako sú najmä protóny, elektróny, pozitrony, mezóny a hyperóny. Tieto častice sú považované za elektricky nabité. Pre látky tvorené molekulami a atómami sú dôležité najmä protóny, elektróny a neutróny, ktoré nenesú elektrický náboj. Protóny spolu s neutrónmi tvoria jadro atómov a elektróny vytvárajú obaly atómov. Atómy sa javia ako elektricky neutrálne, pretože dochádza ku vzájomnej kompenzácií poľa kladných a záporných nábojov, z dôvodu rovnakého počtu protónov a elektrónov v nich. Ak dôjde k odtrhnutiu elektrónu z obalu atómu, dochádza k jeho premene na elektricky nabitú časticu nazývanú kladný alebo záporný ión. Makroskopické teleso sa považuje za elektricky nabité, pokiaľ sa na jeho povrchu alebo v jeho vnútri vytvorí prebytok kladných respektíve záporných častíc. Základné vlastnosti elektrického náboja sú formulované do zákona zachovania náboja a zákona o silovom pôsobení nábojov. [1] [2]

Zákon zachovania náboja definuje, že celkové množstvo náboja v izolovanej sústave zostáva konštantné a jeho množstvo je rovné algebrickému súčtu všetkých nábojov tejto sústavy. [1]

Zákon o silovom pôsobení nábojov hovorí, že náboje vytvárajú vo svojom okolí elektrické pole, ktoré sa teoreticky rozprestiera donekonečna, avšak so vzrastajúcou vzdialenosťou jeho účinky slabnú. Tieto účinky sa šíria do okolia rýchlosťou, ktorá je závislá na type prostredia, pričom najvyššia je vo vákuu, kde sa rovná rýchlosti svetla vo vákuu ($c = 2,9979 \times 10^8$ m/s). Pre kvázistacionárne pole platí, že oproti rýchlosti svetla sa náboje pohybujú pomerne nízkymi rýchlosťami. Pre vzájomnú interakciu nábojov v kvázistacionárnom platí Coulombov zákon podľa vzťahu (1.1).

$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad [N] \quad (1.1)$$

Kde F je sila ktorou na seba pôsobia dva bodové náboje, k je konštanta úmernosti charakterizujúca prostredie, veľkosť jednotiek náboja, dĺžky a sily, Q_1 a Q_2 sú náboje a r^2 je kvadrát ich vzájomnej vzdialenosti. [1]

Keďže sila je vektorová veličina, uvádza sa Coulombov zákon vo vektorovom tvare podľa vzťahu (1.2).

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|^3} (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{|\mathbf{r}_{12}|^3} \cdot \mathbf{r}_{12} \quad [N] \quad (1.2)$$

Kde \mathbf{F}_{12} je sila ktorou pôsobí náboj Q_1 na náboj Q_2 , k je konštanta úmernosti charakterizujúca prostredie, veľkosť jednotiek náboja, dĺžky a sily a má kladnú konvenciu, ε_0 je permitivita vákua, \mathbf{r}_{12} je polohový vektor náboja Q_2 vzhľadom na náboj Q_1 . Coulombov zákon vo vektorovom tvare vystihuje aj fakt, že súhlasné náboje sa navzájom odpudzujú a nesúhlasné priťahujú. [1] [2]

1.2 Rozdelenie látok podľa elektrickej vodivosti

Elektrická vodivosť popisuje schopnosť látok zabezpečiť nabitým časticiam transport na veľké vzdialenosti – v porovnaní s rozmermi samotných atómov. Na základe tejto schopnosti sa látky rozdeľujú na vodiče, polovodiče a izolanty (dielektriká). [1]

1.2.1 Vodiče

Vodiče sú látky obsahujúce veľké množstvo voľných nosičov náboja, ktoré sú schopné sa vo vodiči usporiadať a vytvárať tak elektrický prúd. Podľa druhu nosičov náboja je rozlišovaná elektrónová vodivosť, ktorou sa vyznačujú vodiče I. triedy a iónová vodivosť, charakteristická pre vodiče II. triedy. Zástupcami vodičov I. triedy sú kovy, medzi vodiče II. triedy patria roztoky kyselín, zásad, roztavené soli a rozžeravené plyny. V kovových vodičoch sú elektróny v najvyšších vrstvách elektrónového obalu k svojmu jadrú pomerne slabo viazané, preto sú schopné úplne sa odpútať a vytvárať v nich tak elektrónový plyn, ktorý dokáže pôsobením vonkajších síl preniesť elektrický náboj z jedného miesta na druhé. [1] [3]

1.2.2 Polovodiče

Ako polovodiče sa označujú látky, ktorých merný elektrický odpor závisí na teplote. Už pri izbových teplotách je časť atómov ionizovaná, čím dochádza k uvoľneniu elektrónov, ktoré sa vedia v látke pohybovať a vytvárať tak elektrický prúd. Pri zahrievaní dochádza k rozpadu ďalších kovalentných väzieb, čím počet voľných elektrónov stúpa, zvyšuje sa merná elektrická vodivosť a ekvivalentne klesá merný elektrický

odpor. Týmto javom sa polovodiče odlišujú od vodičov, pri ktorých sa merný elektrický odpor s narastajúcou teplotou zvyšuje. Jav uvoľňovania elektrónov a vedenie elektrického prúdu spôsobené pohybom voľných elektrónov proti smeru intenzity elektrického poľa je charakteristické pre polovodiče s vodivosťou typu N (negativus - záporný). Ich vodivosť sa označuje ako elektrónová. Súčasne s prerušením kovalentnej väzby a uvoľnením elektrónu dochádza k lokálnemu narušeniu elektrickej neutrality. V tomto mieste zostáva nevykompenzovaný kladný náboj označovaný ako kladná diera. Diera má rovnakú veľkosť náboja ako elektrón, rozdiel je v znamienku, ktoré je pri diere kladné. Elektrická vodivosť spôsobená usporiadaným premiestňovaním kladných dier v smere intenzity elektrického poľa sa nazýva dierová vodivosť a je charakteristická pre polovodiče typu P (positivus – kladný) Medzi typické polovodiče patria chemické prvky germánium *Ge*, kremík *Si*, telúr *Te*. Ukážka polovodičov sa nachádza na Obrázku 1. [1] [4]

5 B	6 C			
	14 Si	15 P	16 S	
	32 Ge	33 As	34 Se	
	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I

Obrázok 1 Skupina polovodičov v Mendeleejevovej tabuľke [4]

1.2.2.1 Elektrické vlastnosti kontaktu polovodičov typu P a N

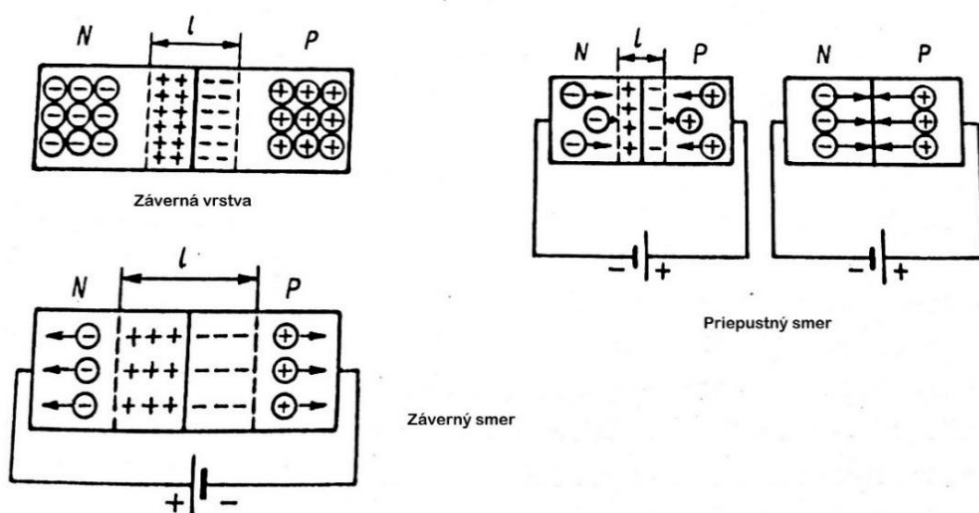
Oblasť polovodiča, kde dochádza k zmene z elektrónovej vodivosti na dierovú alebo naopak sa nazýva PN prechod. Môže k nej dochádzať v monokryštále polovodiča, v ktorom sa pridaním prímеси vytvorí oblasť s rozdielnym typom vodivosti. [4]

Pri styku polovodičov s rozdielnym typom vodivosti dochádza k difúzii nosičov prúdu kontaktom. Difúznym pohybom elektrónov z polovodiča typu N do polovodiča typu P, sa v stykovej oblasti na strane polovodiča typu N vytvorí nevykompenzovaný kladný náboj a analogickým princípom sa v stykovej oblasti na strane polovodiča typu P vytvorí nevykompenzovaný záporný náboj. Tento stav rozloženia náboja je popisovaný ako záverná vrstva. Záverná vrstva bráni prechodu ďalších elektrónov a dier rozhraním polovodičov, pretože má väčší odpor než ostatné časti polovodiča. [4]

Pripojenie PN prechodu na zdroj sa dá zrealizovať v priepustnom alebo závernom smere. PN prechod sa vyznačuje jednosmernou vodivosťou a preto je používaný ako usmerňovač striedavého napätia (prúdu).

Priepustný smer je dosiahnutý pripojením polovodiča typu N na záporný pól zdroja a polovodiča typu P na kladný pól zdroja, kedy dochádza k pohybu kladných aj záporných nábojov k rozhraniu polovodičov a zaplneniu dier elektrónmi. Hrúbka závernej vrstvy sa znižuje, čím klesá aj jej odpor a kontaktom prechádza elektrický prúd. [4]

Záverný smer sa získa pripojením polovodiča typu N na kladný pól zdroja a polovodiča typu P na jeho záporný pól. Vplyvom tohto zapojenia sa elektróny a diery presúvajú v smere od styku polovodičov, záverná vrstva tým zväčšuje svoju hrúbku, odpor a elektrický prúd kontaktom neprechádza. [4] Usporiadanie PN prechodu je znázornené na Obrázku 2.



Obrázok 2 Kontakty polovodičov typu P a N [4]

1.2.3 Izolanty

Medzi izolanty – dielektriká sa zaraďujú látky, v ktorých je obsiahnuté len malé množstvo voľných nosičov náboja, preto v nich nedochádza k vedeniu elektrického prúdu. V porovnaní s vodičmi je ich vodivosť o 15 – 24 rádov menšia. Za normálnych podmienok v nich teda nie je možné dosiahnuť usporiadaný pohyb voľných nábojov. Špeciálnym prípadom je elektrický pieraz dielektrika, kedy sa vysokým napätím spôsobeným silným elektrickým poľom alebo ohriatím izolantu na vysoké teploty docieli vnútorná ionizácia. Takto uvoľnené nosiče náboja ionizujú ostatné častice a vzniká

vodivý kanál, čím dielektrikum stráca svoje vlastnosti. K izolantom patria niektoré pevné látky ako napríklad sklo, porcelán, drevo, väčšina plastov, kvapaliny chlórmetán CH_3Cl , a plyny ako napríklad vodík H_2 , dusík N_2 , amoniak NH_3 a iné. [1] [4]

1.3 Elektrostatické pole

Za elektrostatické pole je považované silové pole, v ktorom sa vyšetrujú vlastnosti a interakcie v inerciálnej vzťažnej sústave nepohyblivých elektricky nabitých telies alebo častíc. Dôležitou charakteristikou elektrostatického poľa je jeho intenzita a potenciál. [4]

Vektorová veličina intenzity E je funkciou kladného náboja Q , ktorého pole popisuje a jeho polohového vektora r . Je definovaná podielom sily F pôsobiacej na náboj Q a veľkosťou náboja Q podľa vzťahu (1.3).

$$E(Q, r) = \frac{F}{Q} \quad [V/m] \quad (1.3)$$

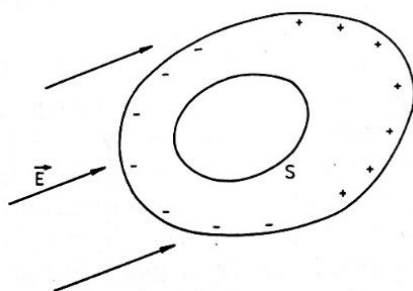
Elektrostatický potenciál je skalárna veličina definovaná prácou, ktorú vykonajú Coulombovské sily pôsobiace medzi nábojmi pri pohybe v elektrostatickom poli. Práca týchto síl nezávisí od trajektórie pohybu, ale len od začiatkovej a konečnej polohy. Pre potenciál bodu B vzhľadom na bod A platí vzťah (1.4).

$$V_B = V_A + \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right) \quad [V] \quad (1.4)$$

Kde V_B je potenciál v bode B, V_A je potenciál v bode A, ϵ_0 je permitivita vákua, Q je náboj a r_B , r_A sú charakteristiky polohy bodov. [1] [3]

1.3.1 Vodič v elektrostatickom poli

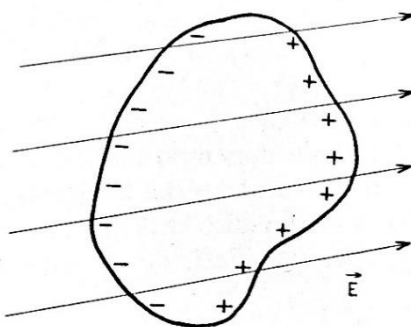
Nabíjaním vodiča a prenosom náboja, sa vykonáva práca proti elektrostatickým silám rastúca s množstvom preneseného náboja. V okolí jednotlivých nábojov na vodiči existuje elektrické pole v priestore, ktoré obklopuje celý vodič, a tiež v samotnom vodiči, ako je znázornené na Obrázku 3. Následkom toho sa prenosom ďalších nábojov dostávajú všetky voľné náboje vo vodiči do pohybu. Elektrické sily konajú prácu na úkor potenciálnej energie nábojov, čím potenciálna energia klesá a klesajú teda aj rozdiely potenciálov na rôznych miestach vo vodiči. Stav, kedy dôjde k vyrovnaniu hladiny potenciálov v celom vodiči sa označuje za ustálený alebo rovnovážny. Pri rovnovážnom stave je potenciál na povrchu vodiča rovný potenciálu vnútri vodiča. Pokiaľ je potenciál v časti priestoru rovnaký, je v tomto mieste nulová intenzita aj priestorová hustota náboja vnútri vodiča. Tento fakt dokazuje, že náboje sú v ustálenom stave rozložené len po povrchu vodiča. Experimentálnym overením je Faradayov valec. [1] [2]



Obrázok 3 Vodič v elektrostatickom poli [1]

1.3.2 Dielektrikum v elektrostatickom poli

V dielektrikách dochádza k reakcií na prítomnosť elektrického poľa, a to z dôvodu prítomnosti atómov a molekúl, ktoré sú sústavami nabitých častíc. Najvýznamnejším javom je polarizácia dielektrika. Vložením dielektrika do elektrického poľa dochádza k polarizácii telesa, čím sa z neho stáva elektrický dipól. Makroskopickým prejavom je vznik viazaného náboja na povrchu telesa, ktorý sa nedá z dielektrika odstrániť bez porušenia molekulárnych väzieb. Náboj má záporný charakter na tej strane telesa, kde vstupujú siločiar vonkajšieho poľa a kladný na strane, kde siločiar z telesa vystupujú, ako je vidno na Obrázku 4. Celkový náboj sa však polarizáciou nemení a zostáva nulový. V dielektriku je elektrické pole dané súčtom vonkajšieho poľa a poľa vzniknutého od viazaného náboja, ktoré smeruje opačne ako vonkajšie pole. Výsledná intenzita pre dielektrikum je teda vždy menšia ako intenzita vonkajšieho poľa. [1]



Obrázok 4 Polarizácia dielektrika [1]

1.4 Elektrodynamika

S pohybom elektrického náboja sú späté elektrodynamické javy, ku ktorým patrí aj elektrický prúd. [1]

1.4.1 Elektrický prúd

Pri elektrostatických poliach sa voľné náboje vo vodičoch pohybujú iba pri vložení do vonkajšieho elektrostatického poľa. Voľné náboje vo vodiči však nie sú schopné sa dostatočne rýchlo rozmiestniť tak, aby vytvorili vnútri vodiča pole, ktoré bude rovnako veľké, ale opačne orientované ako vonkajšie elektrické pole, čo by spôsobilo, že výsledné pole bude mať nulovú hodnotu. Pripojením vodiča k zdroju je teda možné dosiahnuť trvalé pôsobenie vonkajšieho elektrického poľa na voľné náboje vo vodiči a vyvolať ich stály pohyb v elektrickom obvode. [3]

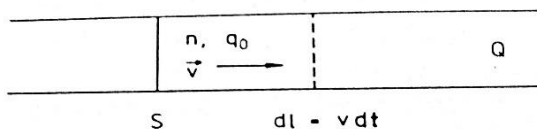
Pohyb elektrických nábojov v priestore a čase sa nazýva elektrický prúd. V závislosti na veľkosti vzdialeností sa rozlišuje mikroskopický (mikro) a makroskopický (makro) prúd. Mikroprúd je tvorený elektrónom obiehajúcim okolo jadra v atóme alebo okolo kladného iónu tuhej látky. Makroprúd tvorí veľké množstvo pohybujúcich sa elektrónov alebo iónov. Podľa vzniku a vlastností je rozlišovaný kondukčný, konvekčný a posuvný prúd. Kondukčný prúd vzniká pohybom nábojov v látke, pokiaľ v nej dochádza k makroskopickému pohybu náboja. Pri kondukčnom prúde dochádza k zahrievaniu vodiča premenou elektrickej energie na teplo, prenosu látky (hlavne pre chemické procesy) a prenosu nekompenzovaného náboja (nabíjanie telies). Konvekčný prúd je prúd nabitých častíc vo vákuu. Posuvný prúd nie je viazaný na pohyb elektrického náboja, ale na časovú zmenu vektoru elektrickej indukcie. Pre všetky typy prúdov je spoločnou vlastnosťou tvorba magnetického poľa. [1]

Na to, aby prúd vznikol a udržal sa v prostredí, kde sú voľné nosiče náboja brzdené, musí na každý voľný náboj pôsobiť sila F . Definovaná je súčinom náboja q_0 a intenzity E podľa vzťahu (1.5).

$$F = q_0 \times E \quad [N] \quad (1.5)$$

Voľné náboje záporného charakteru sa pohybujú proti smeru poľa E , kladné ióny v smere poľa E . Pokiaľ bude vo vodiči udržaná konštantná hodnota intenzity, nastáva ustálený stav, respektíve prúd. Ak sa bude hodnota intenzity meniť, prúd bude premenný. Prúd, ktorý nemení svoj smer iba veľkosť je jednosmerný, prúd s meniacim sa smerom je striedavý. Smer elektrického prúdu je zhodný so smerom toku kladných nábojov. [1]

Jednosmerný elektrický prúd I je definovaný ako časová derivácia náboja Q , ktorá prešla určitou plochou S .

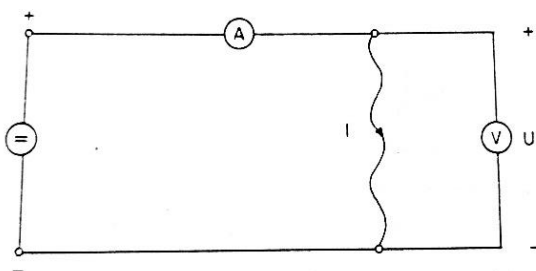


Obrázok 5 Znáznornenie úseku vodiča s konštantným prierezom pre odvodenie rovnice elektrického prúdu [1]

Z Obrázku 5 potom vyplýva vzťah pre výpočet elektrického prúdu (1.6).

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{n \cdot q_0 \cdot S \cdot v}{dt} \quad [A] \quad (1.6)$$

Kde S je prierezová plocha vodiča, q_0 je náboj, v je rýchlosť pohybu náboja. [1]



Obrázok 6 Schéma vhodného usporiadania pre odvodenie Ohmovho zákona [1]

Dôležitým zákonom je Ohmov zákon pre úsek lineárneho vodiča. Schému zapojenia pre odvodenie tohto zákona je vidno na Obrázku 6. Ohmov zákon vyjadruje vzťah medzi napätím U na úseku vodiča a prúdom I , ktorý cez úsek preteká (1.7).

$$I = f(U) \quad (1.7)$$

Každý vodič, okrem vodičov v supravodivom stave, vykazuje pri prechode elektrického prúdu elektrický odpor – rezistanciu. Pre vodič pri prechode jednosmerného prúdu platia vzťahy (1.8), (1.9), (1.10).

$$U = R \cdot I \quad [V] \quad (1.8)$$

$$I = G \cdot U \quad [A] \quad (1.9)$$

$$G = \frac{1}{R} \quad [S] \quad (1.10)$$

Kde R je odpor – rezistencia vodiča, G je vodivosť – konduktancia vodiča. Pre odpor homogénnych vodičov konštantného prierezu platí vzťah (1.11).

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad [\Omega] \quad (1.11)$$

Kde ρ je merný odpor vodiča, l je jeho dĺžka a S kolmá prierezová plocha. [1]

1.4.1.1 Striedavý elektrický prúd

Ak je do elektrického obvodu pripojený zdroj striedavého elektromotorického napätia, vytvorí sa v obvode striedavý prúd. Pri prechode striedavého prúdu obvodom dochádza k vzniku striedavého magnetického poľa, ktorého zmenou sa indukuje elektromotorické napätie, preto má každý vodič okrem rezistancie aj indukčnosť (najmä cievky) a kapacitu (hlavne kondenzátory). Tieto tri súčasti – rezistencia R , indukčnosť L a kapacita C tvoria v rôznych spojeniach elektrické obvody, ktoré sa v uzavretých prípadoch nazývajú okruhy. Na rozdiel od jednosmerných prúdov, pri striedavých prúdoch sa napätie mení s časom a uplatňujú sa všetky vlastnosti R, L, C . [5]

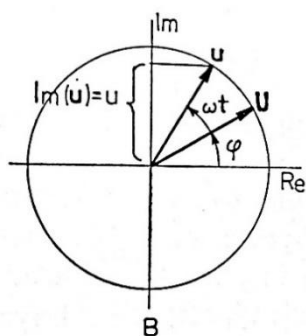
Striedavé napätie sa dá získať viacerými spôsobmi, záleží na účele použitia. Najčastejšie používané spôsoby sú odvedenie striedavého napätia od jednosmerného cez potenciometer alebo periodický prepínač, výroba striedavého prúdu pomocou oscilátora a výroba v generátoroch pomocou elektromagnetickej indukcie. [1]

Spôsob vedenia striedavého prúdu v látkach je v podstate rovnaký ako pri jednosmernom prúde – tiež ho tvoria pohybujúce sa voľné nosiče náboja. Rozdiel je v strednej usmernenej rýchlosti, ktorá mení svoju veľkosť (napríklad podľa sínusovej funkcie) a svoj smer na opačný každú polovicu periódy. Pre takýto obvod opisujú priebeh elektromotorického napätia a prúdu rovnice (1.12), (1.13), (1.14).

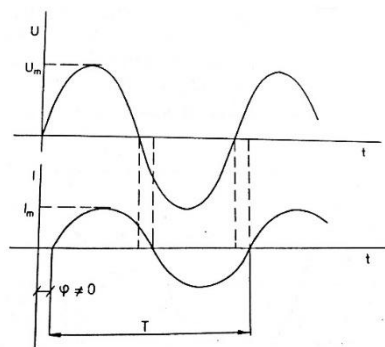
$$U_e = U_m \cdot \sin \omega \cdot t \quad [V] \quad (1.12)$$

$$I = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad [A] \quad (1.13)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2 \cdot \pi}{T} \quad [rad/s] \quad (1.14)$$



Obrázok 7 Časový vektor sínusovo premennej veličiny [5]



Obrázok 8 Priebeh harmonických napätí a prúdov [1]

Kde U_e, I sú okamžité hodnoty napätia a prúdu, U_m a I_m sú amplitúdami napätia a prúdu a argument funkcie *sínus*, ktorá vyjadruje harmonickosť priebehu, je fázový posun. [1] [4] [5] Schéma pre odvodenie rovníc pre striedavý elektrický prúd a harmonickosť priebehu je ukázaná na Obrázku 7 a Obrázku 8.

Uhol fázového posunu φ napätia vzhľadom na prúd pri obvodoch so zložkami *RLC* (meraný od vektoru prúdu smerom k vektoru napätia) je určený vzťahom (1.15).

$$tg\varphi = \frac{I_m(Z)}{R_e(Z)} = \frac{1}{R} \left(L \cdot \omega - \frac{1}{C \cdot \omega} \right) = \frac{(X_L - X_C)}{R} \quad [-] \quad (1.15)$$

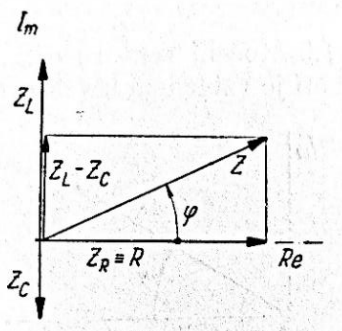
Kde $I_m(Z)$ je imaginárna časť vektoru Z a $R_e(Z)$ je jeho reálna časť.

Pre reláciu medzi amplitúdami prúdu I_0 a elektromotorického napätia U_e platí vzťah (1.16).

$$I_0 = \frac{U_e}{Z} = \frac{U_e}{\sqrt{R^2 + (L \cdot \omega - \frac{1}{C \cdot \omega})^2}} \quad [A] \quad (1.16)$$

Relácia (1.16) je matematickou formuláciou Ohmovho zákona pre striedavý prúd, kde je amplitúda striedavého prúdu priamo úmerná amplitúde elektromotorického napätia a nepriamo úmerná impedancií obvodu. [2]

Impedancia Z uvádzaná vo vzťahoch (1.15) a (1.16) je zdanlivý odpor striedavého prúdu. Impedancia je komplexná veličina, ktorá sa dá spočítať graficky podľa Obrázku 9.

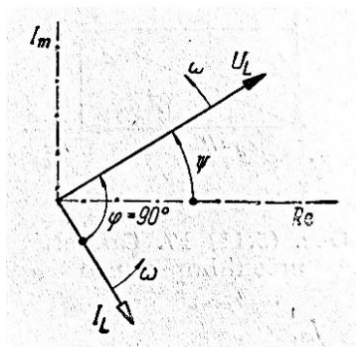


Obrázok 9 Schéma pre výpočet impedancie pre obvody *RLC* [2]

Z Obrázku 9 potom vyplýva vzťah (1.17).

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + (L \cdot \omega - \frac{1}{C \cdot \omega})^2} \quad [\Omega] \quad (1.17)$$

Kde X_L je indukancia (indukčná reaktancia). Ak indukancia stojí v obvode samostatne oneskoruje zmeny prúdu za zmenami elektromotorického napätia vplyvom vlastnej indukcie, čo je zrejmé z Obrázku 10. [2]



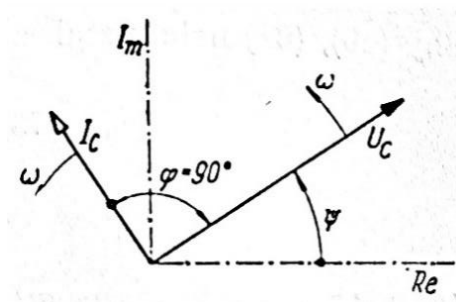
Obrázok 10 Vektor napätia a prúdu v obvode s indukčnosťou [2]

Induktancia je daná vzťahom (1.18)

$$X_L = \omega \cdot L \quad [\Omega] \quad (1.18)$$

Kde L je indukčnosť obvodu. [2]

Veličina X_C zo vzťahu (1.15) a (1.17) je kapacitancia (kapacitná reaktancia), ktorá ak stojí v obvode so striedavým prúdom samostatne spôsobuje vplyvom nabíjania kondenzátora oneskorenie kmitov napätia za prúdom. Túto charakteristiku popisuje Obrázok 11. [2]



Obrázok 11 Vektor napätia a prúdu v obvode s kapacitou [2]

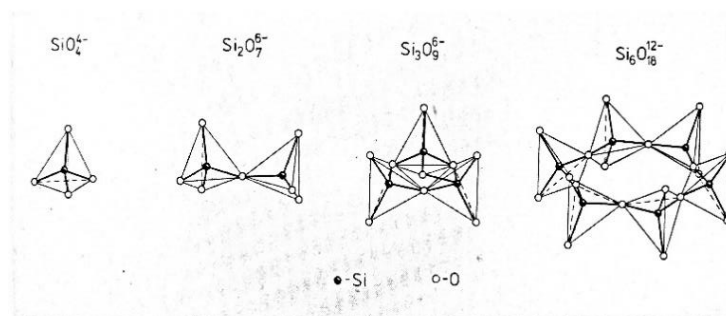
Kapacitancia sa vypočíta podľa vzťahu (1.19)

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad [\Omega] \quad (1.19)$$

Kde C je kapacita kondenzátora. [2]

2 SILIKÁTY A SILIKÁTOVÉ SPOJIVÁ

Kremičitany (silikáty) sú zlúčeniny obsahujúce rozmanité útvary väzieb $Si - O - Si$ a ich vlastnosti sú podmienené, okrem zloženia, stavbou kremičitanovej kostry. Základnou stavebnou jednotkou kremičitanovej kostry je tetraéder SiO_4 spájajúci sa s inými tetraédrami cez spoločný atóm kyslíka. Atómy kremíka môžu byť sčasti nahradené atómami hliníka, kedy vytvárajú hlinítokremičitany, prípadne inými prvkami ako bór, fosfor a iné. Dva tetraédre majú vždy len jeden spoločný atóm kyslíka, pričom sa tetraédre môžu spájať s ostatnými tetraédrami do väčších celkov aj všetkými štyrmi atómami kyslíka. Podľa stupňa spojenia tetraédrov SiO_4 sa rozlišujú kremičitany a hlinítokremičitany s ostrovčekovitou štruktúrou, ktorú vidno na Obrázku 12 (olivín, granát), reťazcovou štruktúrou (enstatit, azbest), vrstevnatou štruktúrou (muskovit, kaolinit) a trojrozmernou štruktúrou (ortoklas, albit, anortit, zeolity). [6] [7]



Obrázok 12 Schéma kremičitanov s ostrovčekovitou štruktúrou [6]

2.1 Spojivá a ich charakteristika

Spojivá sú látky, ktoré majú schopnosť samovoľného spevňovania, pričom spájajú zrnité alebo kusové systémy v kompaktné celky. Spojivá by mali pre svoju funkčnosť spĺňať vlastnosti ako tekutosť na počiatku pôsobenia (zabezpečenie rovnomerného rozmiestnenia spojiva na povrchu a v póroch zrnitého komplexu), zmáčanie povrchu spájaného materiálu, samovoľné spevnenie po vhodnom čase (napríklad vysušením gélu) a stálosť adhézných spojov aj po zatuhnutí spojiva. Výsledná pevnosť spájaných disperzných systémov je funkciou pevnosti spoja, plniva a samotného spojiva. Rozloženie spojiva v zrnitom komplexe je významným faktorom kvality spojenia sústavy do celku. [8] [9]

Podľa procesov ku ktorým dochádza pri tuhnutí a tvrdnutí spojív sa spojivá rozdeľujú na:

- Chemické – dochádza pri nich k zmenám chemického zloženia.

- Mechanické – nedochádza tu k zmenám chemizmu, tuhnutie či tvrdnutie je výsledkom fyzikálnych procesov (zmena teploty, skupenstva, odparenie a iné), patria sem napríklad asfalty, dechty a niektoré druhy lepidiel. [8] [9]

Pre spojivá využívané v stavebníctve sú uplatňované princípy chemického spájania, avšak priebeh tuhnutia a tvrdnutia je sprevádzaný aj fyzikálnymi procesmi.

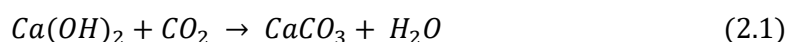
Podľa chemickej skladby sa rozlišujú spojivá:

- Organické – napríklad zmienené asfalty, dechty, syntetické živice, ktoré ale nebudú predmetom tejto práce.
- Anorganické (minerálne) – maltoviny, ďalej použité v tejto práci.

Anorganické spojivá sa získavajú pálením vhodných hornín, ktoré po rozmletí a zmiešaní s vodou vykazujú väzobné schopnosti, tuhnú a tvrdnú. Podľa typu prostredia, v ktorom tvrdnú sa rozdeľujú na maltoviny vzdušné – tvrdnú len na vzduchu a v stvrdnutom stave nie sú odolné proti pôsobeniu vody a hydraulické, ktoré tvrdnú a ostávajú stále na vzduchu aj pod vodou. Výsledná pevnosť anorganických spojív súvisí s veľkosťou, tvarom, rozložením častíc a pórov, a tiež je závislá na charaktere rozhrania medzi elementárnymi časticami spojiva. [8] [9]

2.1.1 Hydraulické spojivá

Hydraulické spojivá sa vyznačujú, ako bolo uvedené v časti 2.1, schopnosťou tuhnúť, tvrdnúť a spevňovať sa na vzduchu aj pod vodou. Tieto vlastnosti sú zapríčinené obsahom oxidu kremičitého SiO_2 , oxidu hlinitého Al_2O_3 a oxidu železitého Fe_2O_3 , ktoré sa nazývajú hydraulické oxidy. Do spojív sa hydraulické oxidy dostávajú pálením vhodných surovín obsahujúcich hydraulické oxidy v zlúčeninách (výroba vápna, cementu) alebo zmiešaním vzdušného spojiva s prísadami, ktoré obsahujú hydraulické oxidy (výroba hydraulického vápna, zmesových cementov). Spojivá, ktoré obsahujú hydraulické oxidy tvrdnú rýchlejšie a dosahujú vyššie pevnosti ako vzdušné spojivá. Tvrdnutie hydraulických spojív sa skladá z dvoch procesov. Prvým je reakcia hydroxidu vápenatého so vzdušným oxidom uhličitým označovaným ako karbonatácia – rovnica 2.1.



Druhým je tvorba pevnej štruktúry kryštalizáciou hydrokremičitanov, hydrohlinitanov, hydroželezitanov vzniknutých po rozpustení spojiva. Podľa druhu spojiva a jeho

chemického zloženia je vplyv oboch procesov rôzny. Pri tvrdnutí pod vodou proces karbonatácie neprebíha a podstatný prínos má druhý proces. [8] [9]

2.1.2 Cementy

Cementy sú spojivá vyrábané výpalom vhodných surovín na medzu slinutia a rozomletím získaných slinkov na prach. Po zamiešaní s vodou tuhnú, tvrdnú a spevňujú sa na vzduchu aj pod vodou, pretože patria medzi hydraulické spojivá. Ako spojivá majú schopnosť spájať iné sypké látky do väčších celkov. Účinnými zložkami cementov sú zlúčeniny CaO s hydraulickými oxidmi SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 (prípadne inými zlúčeninami podobného typu). [8] [9]

Cementy sú zložené z rôznych mineralogických zložiek a podľa prevažujúcej aktívnej zložky sa rozdeľujú na:

- Kreičitanové – ich zástupcom je najmä portlandský cement.
- Hlinitanové – patrí k nim hlinitanový cement.
- Špeciálne cementy – ako napríklad železitanový cement.

Podľa použitia hydraulických prísad sa cementy delia na:

- Jednozložkové – tieto cementy nemajú pridané prísady, príkladom je portlandský cement.
- Dvojzložkové – obsahujú jednu pridanú hydraulickú prísadu, patrí sem troskoportlandský cement a vysokopecný cement.
- Viaczložkové – cementy, ktoré zahŕňajú viac ako jednu hydraulickú prísadu, pripravujú sa však skôr výnimočne. [8] [9]

Podľa normy ČSN EN 197-1 ed. 2 sa cementy rozdeľujú do nasledujúcich piatich kategórií:

- CEM I Portlandský cement
- CEM II Portlandský cement zmesový
- CEM III Vysokopecný cement
- CEM IV Puzolánový cement
- CEM V Zmesový cement [10]

2.1.2.1 Portlandský cement

Portlandský cement je súhrnné označenie cementov rôznych druhov s modifikovanými vlastnosťami a so zhodným výrobným postupom. Postup pozostáva z výpalu surovinovej zmesi z vápencov, ílov a hlin do slinutia čím vzniká slinok, jeho chemické zloženie zobrazuje Tabuľka 1. Zo slinku sa jemným zomletím s prídavkom regulátora tuhnutia (sádrovec) získava portlandský cement. Portlandský cement obsahuje slinkové minerály v kryštalickej fáze (najmä C_3S , C_2S , menej C_3A , C_4AF) a sklenú fázu. Tuhnutie a tvrdnutie portlandského cementu súvisí s chemickými reakciami prebiehajúcimi medzi slinkovými minerálmi a vodou, za vzniku hydrosilikátov a hydroaluminátov vápenatých. [7] [8] [9]

Tabuľka 1 Chemické zloženie portlandského slinku [7]

Zložka	Percentuálne zastúpenie [%]
CaO	63 – 66
SiO ₂	21 – 24
Al ₂ O ₃	4 – 8
Fe ₂ O ₃	2 – 4
MgO	0,5 – 6
K ₂ O a Na ₂ O	0,4 – 1
SO ₃	0,3 – 1
TiO ₂	0,2 – 0,5
P ₂ O ₅	0,1 – 0,3

2.1.2.2 Hlinitanový cement

Výroba hlinitanového cementu je možná slinovaním alebo tavením v elektrickej peci jemne mletej zmesi bauxitu s vápencom (vápnom). Produkt sa melie bez prídavku regulátora tuhnutia. Hlinitanové cementy obsahujú minimálne o 35 % Al_2O_3 viac než portlandské. Z hľadiska mineralógie sú zložené najmä z CA , CA_2 , $C_{12}A_7$, ktorých hydratácia zabezpečuje tvrdnutie hlinitanových cementov a rýchly vývin pevností. Problémom je vznik metastabilných hydratačných produktov, ktoré v čase konvertujú na stabilnú formu za zmenšenia objemu, preto sa nesmú používať do konštrukčných betónov. V súčasnosti sa preto využívajú na výrobu žiaruvzdorných mált a betónov. [7] [8] [11]

3 VODIVÉ FÁZY V KOMPOZITOCH

Kompozitné materiály sa v súčasnosti stávajú celosvetovo značne využívanými v rôznych odvetviach priemyslu, čomu zodpovedá aj ich rýchly vývoj, a to najmä pre ich schopnosť kombinovať vo výsledných produktoch rozmanité vlastnosti. [12]

3.1 Kompozit

Prívlastok kompozitný znamená zložený z dvoch alebo viacerých odlišujúcich sa častí. Kompozit je teda materiál z dvoch alebo viacerých fáz, ktoré majú jednoznačne odlišné fyzikálne vlastnosti, pričom v dôsledku ich kombinácie a synergie má aj výsledný kompozitný materiál iné vlastnosti než jeho zložky. Vlastnosti kompozitov sú závislé okrem samotných zložiek aj na ich tvare, vzájomnej interakcii, distribúcii, objemovej alebo hmotnostnej koncentrácii v systéme, a pri nerovnoosých tvaroch aj na ich orientácii (anizotropné vlastnosti). [12]

Kompozit sa skladá z matrice, tvoriacej spojitú fázu a ostatných nespojitých fáz – disperzií, ktoré by mali byť v kompozitoch ideálne rovnomerne zastúpené.

Podľa tvaru sú rozlišované:

- Vlákňité disperzie – tvoria ich vlákna.
- Disperzie s jednorozmernými časticami – tvoria ich ihličky, tyčinky a iné.
- Disperzie s vrstevnatými časticami – tvoria ich doštičkovité útvary.
- Disperzie s izometrickými časticami – tvoria ich globule.
- Doskovité disperzie – majú špeciálny tvar, mizne rozdiel medzi matricou a disperziou. [13]

3.2 Elektricky a tepelne vodivé disperzie

Pre úpravu vodivostných vlastností sa v kompozitných materiáloch na silikátovej báze využívajú vlákňité aj časticové disperzie (fázy). [14]

3.2.1 Vodivé fázy vlákňitého charakteru

3.2.1.1 Uhlíkové vlákna (Carbon fibres – CF)

Sú to vlákna s priemerom v rádoch mikrometrov, ktoré obsahujú aspoň 92 % uhlíku (99 % a viac obsahujú grafitové vlákna). Zložené sú z kryštálov uhlíka, usporiadaných do dlhých reťazcov a orientovaných v smere pozdĺžnej osi vlákna. Najrozšírenejšie sú PAN vlákna, ktoré sú vyrobené z polyakrylonitrilu. [15]

Komerčne sú dostupné vlákna so všeobecným využitím, vysokopevnostné vlákna a aktivované uhlíkové vlákna. Vlákna so všeobecným využitím majú amorfnú a izotropnú štruktúru, nižšiu pevnosť v ťahu a nízky modul pružnosti, ich výhodou je dostupná cena. Vysokopevnostné vlákna obsahujú viac uhlíka, majú anizotropnú štruktúru a vďaka týmto faktorom dosahujú vyššie pevnosti a tiež modul pružnosti. Pre aktivované vlákna je charakteristický veľký obsah otvorených mikropórov, ktoré slúžia na adsorpciu. [16]

Moduly pružnosti vlákien sa pohybujú od 100 – 450 GPa a pevnosti v ťahu môžu dosahovať až 4,5 GPa. Priemer vlákien je 5 – 10 μm . Medzi charakteristické vlastnosti patrí výhodný pomer medzi pevnosťou a hmotnosťou, vysoká tuhosť, odolnosť voči korózii, chemická stabilita, tepelná a elektrická vodivosť. [17]

Na Obrázku 13 je ukážka sekaných uhlíkových vlákien od výrobcu *Zoltec* ktorý udáva rezistivitu $1,55 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$. [18]



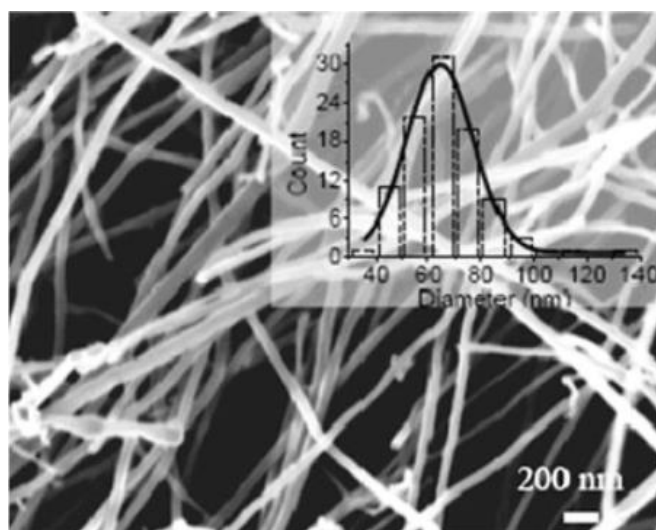
Obrázok 13 Sekané uhlíkové vlákna [18]

3.2.1.2 Uhlíkové nanovlákná (Carbon nanofibres – CNF)

Ide o uhlíkové vlákna v nano rozmerovej oblasti patriace medzi kovalentné uhlíkové materiály. Jedná sa o uhlíkový materiál, ktorý je kvázi jednorozmerný a podľa štrukturálnych charakteristík sa dajú nanovlákná rozdeliť na duté a plné. Ich priemer je väčšinou v rozmedzí od 10 do 500 nm a ich dĺžka od 0,5 do 200 μm . Uhlíkové vrstvy v CNF sú kryštalicky pravidelne orientované, pričom jednotlivé vrstvy sú sústredené väčšmi na vonkajších okrajoch vlákien (touto vlastnosťou sa CNF odlišujú od CNT vlákien). Tieto vlákna sa vyrábajú hlavne katalytickým chemickým vylučovaním z plynnej fázy za prítomnosti pomocných katalyzátorov. Princípom tejto metódy je rozklad molekúl v plynnej fáze pri vysokých teplotách a ukladanie uhlíka v prítomnosti

katalyzátora na báze prechodného kovu na substrát. Na tomto substráte dochádza následne k nárastu vlákna okolo častíc katalyzátora. CNF vlákna sú preferované najmä pre nízku hustotu, vysokú pevnosť, vysoký modul pružnosti, stabilitu do teplôt 3000 °C a vysokú vodivosť (elektrickú aj tepelnú). [19] [20] [21]

Výrobca *Applied Sciences* uvádza tepelnú vodivosť 1950 W/m·K a rezistivitu $55 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ pri pevnosti v ťahu 7 GPa. [22] Ukážku vlákien CNF obsahuje Obrázok 14.

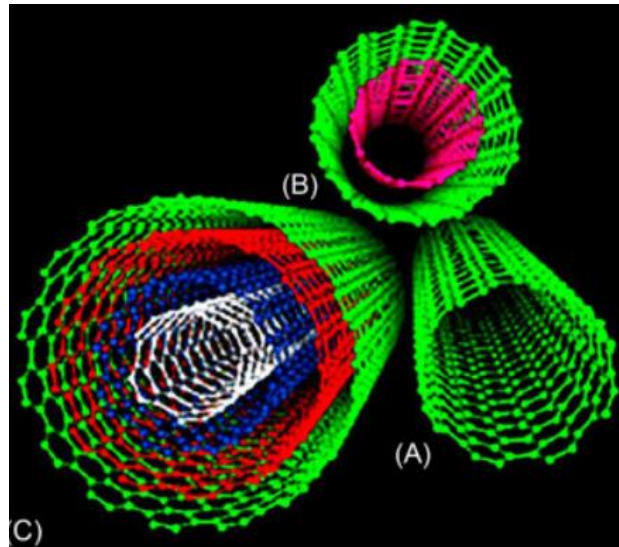


Obrázok 14 Snímka CNF z elektrónového mikroskopu [19]

3.2.1.3 Uhlíkové nanotrubičky (CNT – Carbon nanotubes)

Sú to alotropické modifikácie uhlíka pozostávajúce z grafénových vrstiev sformovaných do valcových trubičiek s priemerom v rádoch nanometrov (v závislosti na počte stien) a dĺžkou v rádoch milimetrov. CNT sa kategorizujú podľa počtu stien na CNT s jednou stenou (SWCNT), s dvomi stenami (DWCNT) a viacerými stenami (MWCNT). SWCNT a DWCNT sú tvorené jedným alebo dvomi grafénovými valcami, kým MWCNT pozostávajú z niekoľkých koncentrických valcových plášťov, ako je vidno na Obrázku 15. Počet plášťov môže byť 3 až 50. Pre veľkú povrchovú plochu, mimoriadnu flexibilitu, nízku hmotnosť a rýchly transport elektrónov majú široké spektrum využitia. [23]

Pre SWCNT výrobca *US Research Nanomaterials* uvádza vonkajší priemer trubičky 1 – 2 nm, dĺžku 15 – 50 μm , elektrickú vodivosť 100 S/cm a tepelnú vodivosť 50 – 200 W/m·K. [24]



Obrázok 15 Ukážka uhlíkových nanotrubičiek A) SWCNT B) DWCNT C) MWCNT [23]

3.2.1.4 Oceľové vlákna (SF – Steel fibre)

Zahŕňajú jednotlivé oceľové vlákna kratších dĺžok a rôznych typov prierezu s pomerom dĺžky ku priemeru od 20 do 100. Vlákna musia byť dostatočne malé, aby bolo možné ich rozptýliť do zmesi bežnými metódami. Fotografia takto pripraveného betónu je na Obrázku 16. Obsah oceľových vlákien v betónoch prispieva k zvýšeniu odolnosti voči trhlinám, nárazom, únavovým prasklinám, a ich prítomnosť zvyšuje tiež húževnatosť produktu. Podľa spôsobu výroby a prierezu sa delia na vlákna ťahané za studena, vlákna vyrezávané z plošných oceľových prvkov, vlákna extrahované z taveniny, vlákna mleté a vlákna modifikované a ťahané za studena. [19]

Podľa potreby udáva výrobca *ArcelorMittal* rôzne upravené a profilované vlákna s dĺžkami od 35 do 60 mm, priermi od 0,55 do 1,3 mm a pevnosťami v ťahu až do 1900 MPa. [25]



Obrázok 16 Betón s obsahom oceľových vlákien [19]

3.2.2 Vodivé fázy časticového charakteru

3.2.2.1 Uhlíkové sadze (CB – Carbon black)

Ide o priemyselne vznikajúce sadze, ktoré zahŕňajú napríklad kanálové, termické, pecné, lampové a acetylénové sadze (podľa výrobného procesu). Pozostávajú z elementárneho uhlíka vo forme sférických koloidných častíc zhlučujúcich sa do agregátov s veľkosťou v rádoch mikrometrov. Sú získavané čiastočným spaľovaním alebo teplotným rozkladom uhľovodíkov. Uhlíkové sadze sú používané hlavne ako plnivá pre gumárenstvo, plasty a tiež ako pigment. Ich prídavkom sú upravované mechanické vlastnosti (navýšenie modulu pružnosti a pevnosti), optické aj elektricko-vodivostné vlastnosti (pridávané sú do termoplastov na zvýšenie vodivosti). [26]

Výrobca *Imerys* ponúka granulované sadze s merným povrchom až 50 až 770 m²/g a sypnou hmotnosťou 135 až 210 kg/m³. Rezistivita sa pohybuje v rozmedzí 20 až 2000 Ω·cm. [27] Ukážka sadzí je na Obrázku 17.



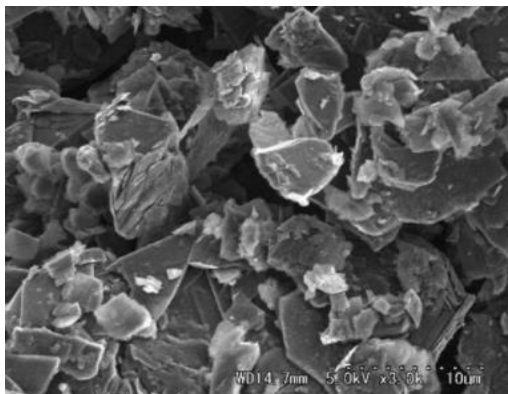
Obrázok 17 Ukážka sadzí rôznej jemnosti [59]

3.2.2.2 Grafitový prach (GP – Graphite powder)

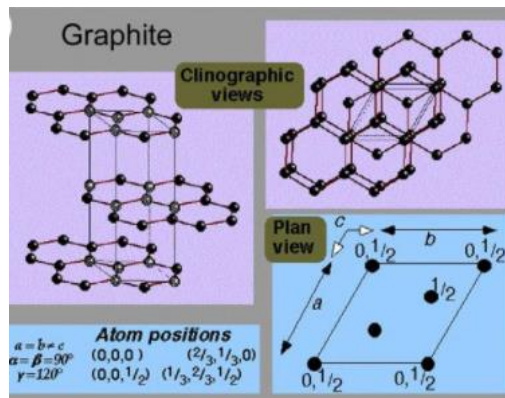
Je to prášok zložený z polymorfného uhlíka, ktorý má vrstevnatú planárnu štruktúru. Na Obrázku 18 je jeho mikroskopická snímka. V jednotlivých vrstvách grafitu sú atómy uhlíka usporiadané a pospájané do pravidelného šesťuholníkového tvaru (tvar včelích plástov, ukážka na Obrázku 19) so separáciou 0,142 nm a vzdialenosťou vrstiev 0,335 nm. Táto stavebná jednotka grafitu v jednej vrstve sa nazýva grafén. Grafit je mäkký vďaka kovalentným väzbám medzi atómami a v závislosti na pôvode sa rozdeľuje do troch foriem: vločkového grafitu, kryštalického grafitu a amorfneho

grafitu. Vo všeobecnosti je grafit dobrým vodičom tepla a električky, je žiaruvzdorný a chemicky stabilný. [19]

Výrobca *TRUNNANO* uvádza pre svoj vločkový grafit veľkosti zŕn od 1 do 3 μm a merný povrch od 18,51 do 26,12 m^2/g . Rezistivita grafitového prášku závisí od formy grafitu a môže dosiahnuť až $9 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$. [28]



Obrázok 18 Snímka GP z mikroskopu [19]



Obrázok 19 Schéma štruktúry grafitu [19]

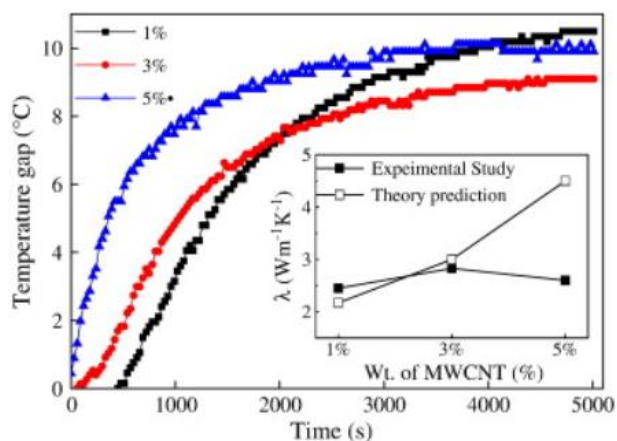
4 SÚČASNÝ STAV POZNANIA V OBLASTI VYHRIEVANÝCH SILIKÁTOVÝCH KOMPOZITOV

Betón, ako hrubozrnný silikátový kompozit, je momentálne druhý (hneď za vodou) v poradí z hľadiska globálne najviac používaných materiálov. Spoločne s vývojom moderných aplikácií sa však zvyšujú aj požiadavky na vlastnosti kompozitov. Prehľad existujúcich štúdií naznačuje, že zlepšenie vlastností cementových kompozitov vychádza z modifikácie ich silikátových matríc. V súčasnosti sa na praktickej úrovni, ale aj na úrovni výskumu využíva najmä integrácia prímiesí, ako sú rôzne druhy vlákien a nanomateriálov. Vývoj sa sústreďuje na výrobu *smart concrete* (inteligentných betónov). K nim patria napríklad *self healing concrete*, *self sensing concrete*, *self heating concrete* a iné. Pre nároky prostredia, ktorému sú vystavené cementové kompozity musia aj tieto vyvíjané inovatívne materiály spĺňať požiadavky na odolnosť a mechanické vlastnosti podľa účelu použitia. [29] [30]

Pri súčasnom vývoji vyhrievaných kompozitov (*self heating concrete*) sa ako nádejná javí integrácia grafénových prvkov do ich matríc. Podľa štúdií dochádza k sľubnému znižovaniu elektrického odporu, ktorého efekt sa dá aplikovať pri rozmrazovaní povrchov vozoviek bez použitia rozmrazovacích látok. [29] [30]

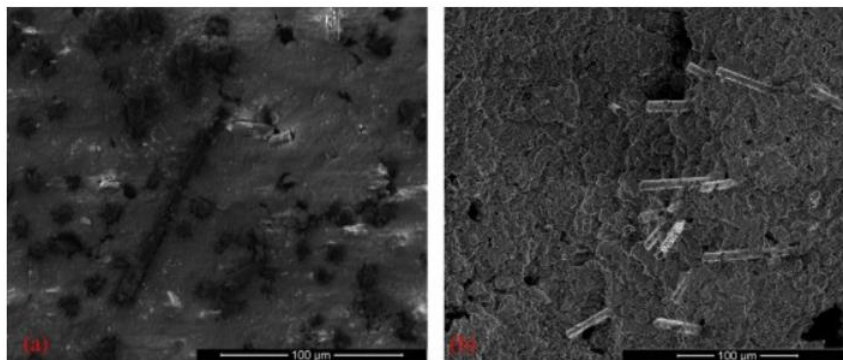
Dôkazom možnosti využitia CF bola výroba výhrevného drôtu, umiestneného do konštrukcie betónovej dosky. Následne bola skúmaná schopnosť rozmrazovania jej povrchu v rôznych expozičných prostrediach a potenciál využitia bol potvrdený. [31]

S použitím CNF a CNT v kompozitoch, bola zistená vysoká efektivita vedenia elektrónov a možná závislosť rezistivity kompozitu na teplote. Pri štúdiách použitia MWCNT na výrobu vyhrievaného kompozitu s cementovou bázou boli taktiež potvrdené zlepšenia tepelnej vodivosti. Treba však poznamenať, že so zvyšujúcim sa množstvom MWCNT dochádza k problémom s rozptýlením fázy do homogénnej podoby, a to pre jej veľký merný povrch. Nerovnomerným rozptýlením a vznikom agregátov sa potom znižuje schopnosť prenosu elektrónov a fonónov (energetických kvánt kmitov kryštálovej mriežky), pretože dochádza k ich rozptýleniu v defektných miestach. Napríklad pri silikátovom kompozite s MWCNT, kde bola sledovaná tepelná vodivosť, bola dosiahnutá hodnota $2.83 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, pri silikátovom kompozite s CF $1.3 - 2.0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ a pri bežnom cementovom kompozite (bez vodivých fáz) $1.58 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Ďalšie zaznamenané parametre znázorňuje Obrázok 20. [31]



Obrázok 20 Vonkajší graf: časová závislosť teplotného spádu medzi dvomi meranými bodmi pri rôznych obsahoch MWCNT v kompozite, vnútorný graf: závislosť súčiniteľa tepelnej vodivosti na množstve MWCNT [31]

Silikátový kompozit s CF vodivou fázou bol taktiež vyskúšaný na letiskovej dráhe. Táto štúdia porovnávala vlastnosti kompozitu „in situ“ a v laboratórnych podmienkach. Záverom boli zistenia poukazujúce na zvyšovanie rezistancie kompozitu použitím vysokoteplotného popolčeka a troskového cementu. Vlastnosti kompozitu v laboratórnych podmienkach a in situ bohužiaľ nebolo možné objektívne porovnávať, pretože došlo k nedodržaniu dávkovania CF do zmesi, čo je badateľné z Obrázku 21. S rastúcou teplotou však rezistivita vrstvy kompozitu klesala. [32]

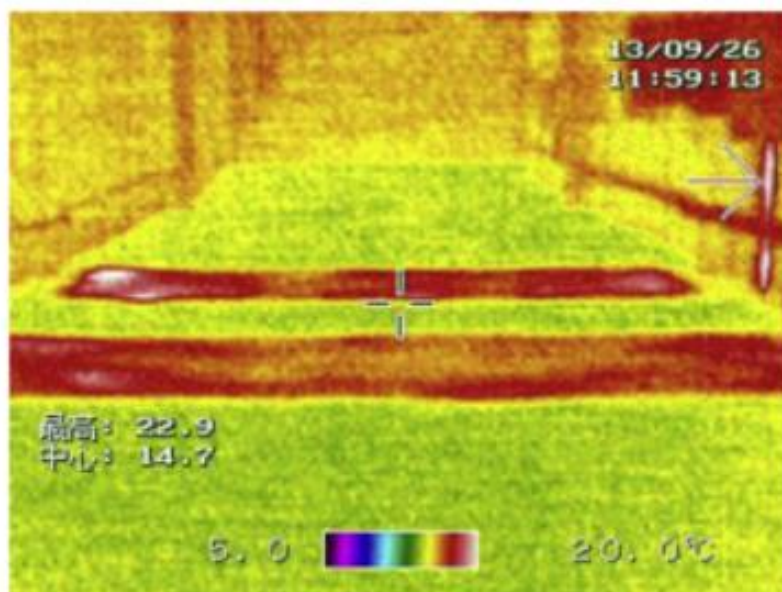


Obrázok 21 SEM snímka z kompozitu použitého pre letiskovú dráhu a) zámes pripravená v laboratórnych podmienkach b) zámes pripravená in situ [32]

Okrem grafénových prvkov sa elektricko-vodivostné vlastnosti kompozitov dosahujú aj prídavkom SF prípadne odpadného oceleového prachu. Podľa dostupných štúdií konduktivita výsledného kompozitu obsahujúceho SF a oceleový prach nezáleží len na použítom množstve, ale aj na jeho dispergácii v priestore. Zvyšovaním dávky oceleového prachu bol zaznamenaný nárast vodivosti a prach fungoval aj ako výplňová zložka pre možné nehomogenity v štruktúre. Pri dávkach nad 5,78 % však dochádzalo

k znižovaniu pevnosti v tlaku. Pri oceľových vláknach je tiež nutné brať ohľad na ich prípadnú koróziu, ktorá by výslednú rezistivitu kompozitu zvýšila. [29]

Na dosiahnutie požadovaných vodivostných vlastností sa dá využiť aj kombinácia grafénových prvkov s oceľovými, a tak vytvorenie viacfázových kompozitov. Príkladom je štúdia, ktorá využíva kombináciu grafitového prášku s oceľovými vláknami a elektródami pre vytvorenie vyhrievaného kompozitu, tvoriaceho povrch konštrukcie parkovacej rampy. Ukážkou z výsledkov tejto štúdie je snímka z termokamery na Obrázku 22, kde vidno plochy, na ktoré bol kompozit aplikovaný. Tieto plochy zreteľne dosahujú vyššiu teplotu než plochy okolité. [33]



Obrázok 22 Snímka z termokamery zachytávajúca vyhrievané časti rampy [33]

Pri inom trojfázovom kompozite boli v dosiahnuté výsledky pre optimálnu zámes 1 % SF a 0,4 % CF a 4 % GP s výslednou 28 – dennou rezistivitou $322 \Omega \cdot \text{cm}$ a pevnosťou v tlaku 40 MPa. Bežná rezistivita vysušeného betónu zodpovedá $6,54 \cdot 10^5$ až $11,4 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$. Trojfázové kompozity teda vykazujú veľmi sľubné vlastnosti z hľadiska vyhrievania. [14]

PRAKTICKÁ ČASŤ

5 CIEĽ PRÁCE

Hlavným cieľom bakalárskej práce je návrh elektricky vodivého silikátového kompozitu schopného zvýšiť svoju teplotu, ktorý by sa mal uplatniť v oblasti údržby exteriérových plôch v zimnom období.

Vyhrievanie by malo prebiehať na základe účinkov vedenia elektrického prúdu kompozitom, preto je nutné, aby navrhovaný kompozit vykazoval znížený elektrický odpor v podobe impedancie. Nízka hodnota impedancie navrhnutého kompozitu bude teda jedným z čiastkových cieľov.

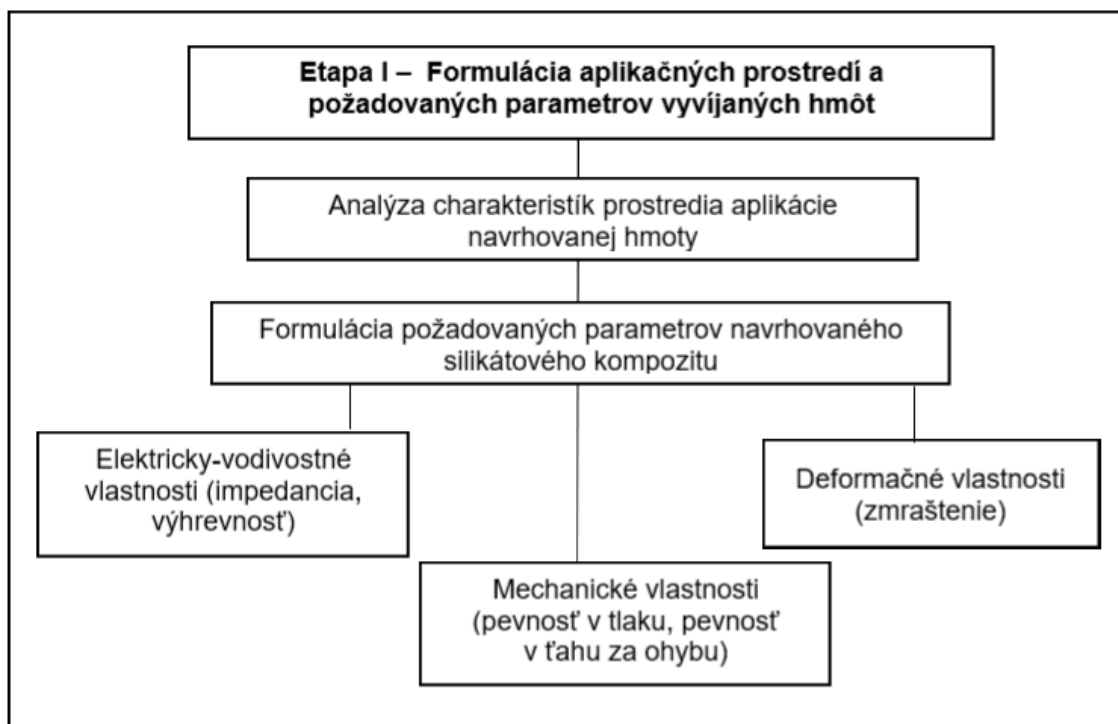
Najdôležitejším cieľom je výroba kompozitu, ktorého schopnosťou bude zvýšiť svoju teplotu prechodom elektrického prúdu. Táto vlastnosť by mala byť dosiahnutá prítomnosťou elektricky vodivého plniva. V ideálnom prípade by sa mohlo jednať o vodivé plnivo druhotného pôvodu, z dôvodu odľahčenia životného prostredia.

Predpokladom je, že novo vyvinutá vyhrievaná hmota bude mať aj vyhovujúce mechanické parametre.

Práca by tiež mala slúžiť ako podklad pre ďalšiu experimentálnu činnosť v rámci vyhrievaných kompozitov.

6 METODIKA PRÁCE

Etapa I: Formulácia aplikačných prostredí a požadovaných parametrov vyvíjaných hmôt

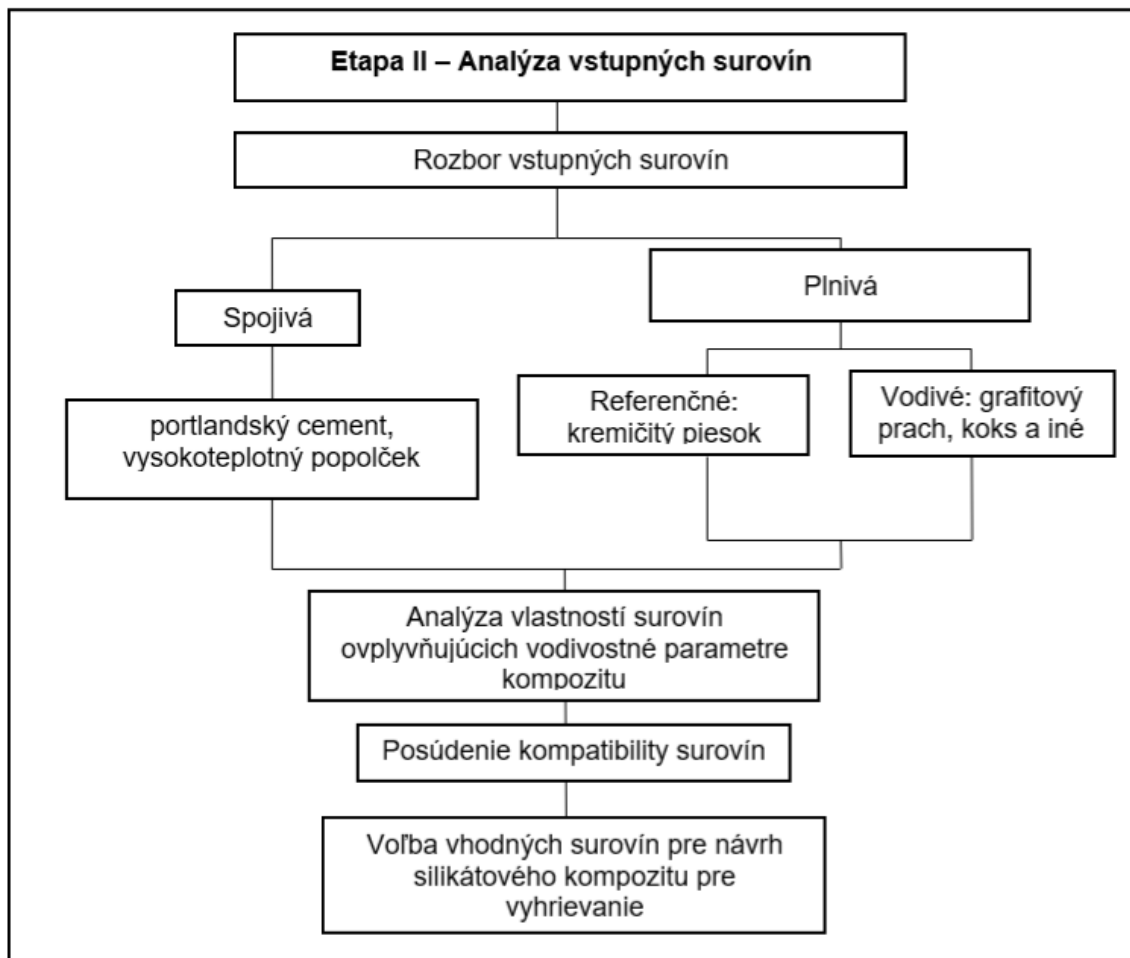


Prvá etapa sa bude zaoberať analýzou existujúcich podmienok v aplikácií silikátových kompozitov a následne formuláciou požiadaviek a parametrov, ktoré bude vhodné dosiahnuť pre zvolenie vyhovujúcich surovín.

Charakteristika prostredia aplikácie bude detailnejšie popisovať prostredie, ktorému sú kompozity počas svojej životnosti vystavené.

Formulácia požadovaných parametrov kompozitu bude zahŕňať požiadavky na konkrétne hodnoty vodivostných vlastností (z hľadiska výhrevnosti) a tiež mechanických vlastností. Deformačné vlastnosti budú charakterizované, ale ich požiadavky nebudú predmetom tejto práce.

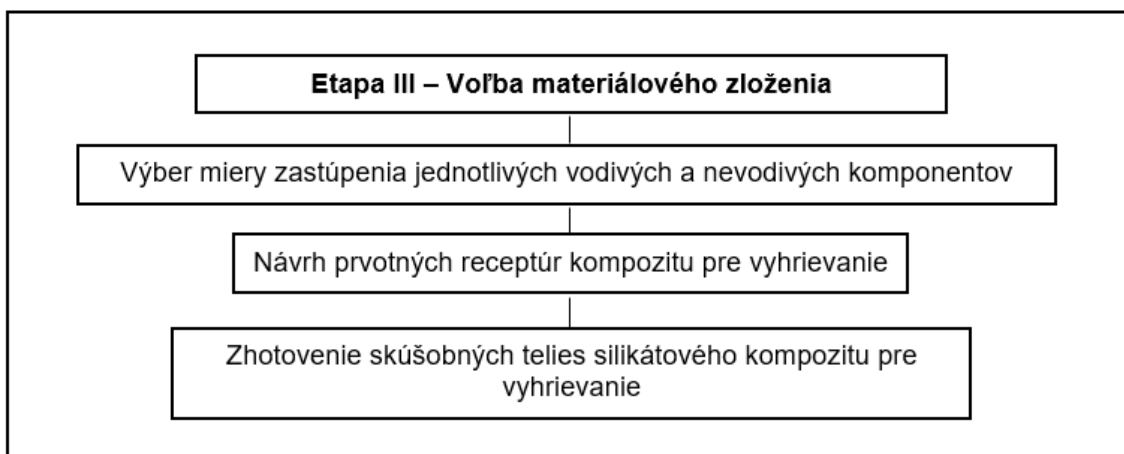
Etapa II: Analýza vstupných surovín pre návrh silikátového kompozitu pre vyhrievanie



Cieľom druhej etapy bude najskôr analyzovať možné vstupné suroviny rozdelené na spojivá a plnivá. Pri spojivách to bude portlandský cement a vysokoteplotný popolček, pri plnivách bude rozlíšená referenčná zložka (bez vodivostného potenciálu) ako kremičitý piesok a vodivá zložka (s vodivostným potenciálom) ako rôzne druhy grafitových prachov, koks a iné.

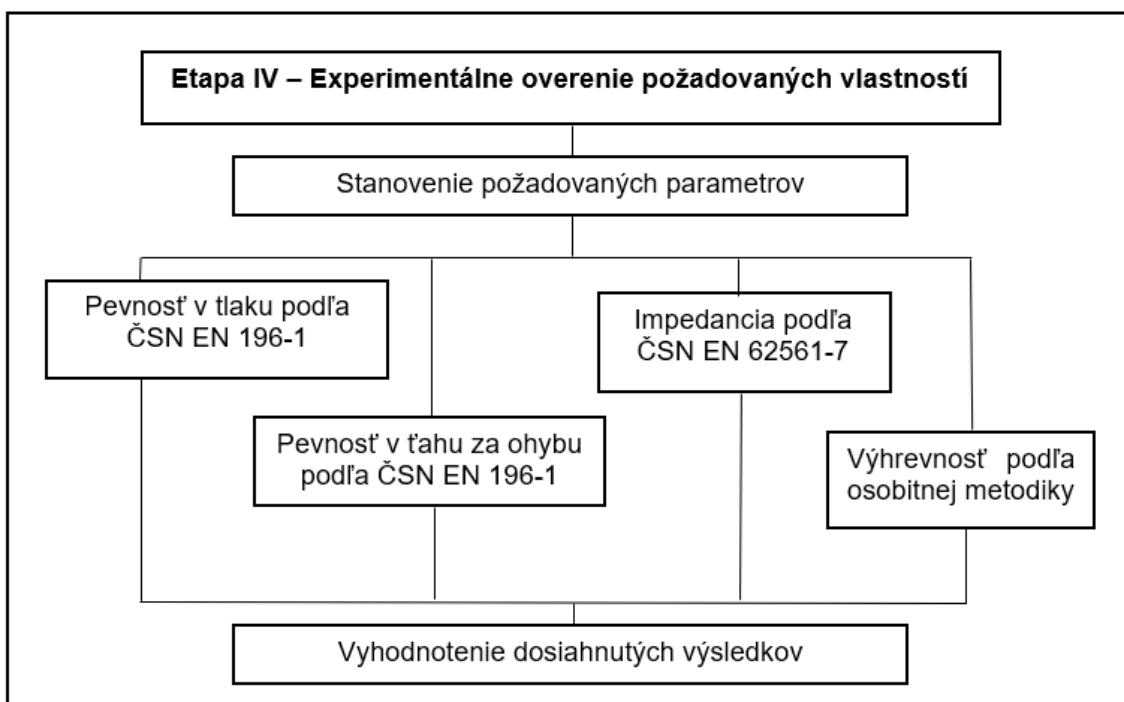
Pre výber surovín budú zmienené analýzy vlastností, ktoré by mohli mať vplyv na vodivostné parametre výsledného kompozitu. Následne bude zvolená vhodná kombinácia zodpovedajúca požiadavkám.

Etapa III: Voľba materiálového zloženia pre prípravu silikátového kompozitu pre vyhrievanie



Tretia etapa bude venovaná návrhu materiálových variantov vhodných pre prípravu silikátového kompozitu pre vyhrievanie. Jednotlivé receptúry budú formulované na základe faktov popísaných v teoretickej časti a analýzy zrealizovanej v Etape II praktickej časti.

Etapa IV: Experimentálne overenie požadovaných vlastností silikátového kompozitu pre vyhrievanie



Štvrtá etapa bude zameraná na laboratórne meranie a stanovenie hodnôt požadovaných parametrov, ako pevnosť v tlaku a pevnosť v ťahu za ohybu podľa ČSN EN 196-1, stanovenie impedancie podľa ČSN EN 62561-7 a stanovenie

výhrevnosti podľa špeciálnej metodiky. Záver bude obsahovať detailné zhodnotenie docielených výsledkov.

7 ETAPA I: FORMULÁCIA APLIKAČNÝCH PROSTREDÍ A POŽADOVANÝCH PARAMETROV VYVÍJANÝCH HMÔT

Pred návrhom hmoty vodivého silikátového kompozitu pre vyhrievanie je potrebné definovať požiadavky na jeho vlastnosti, a to aj v závislosti na expozičných faktoroch prostredia, v ktorom bude kompozit umiestnený a využívaný.

7.1 Charakteristika prostredia aplikácie kompozitu pre vyhrievanie

Na vyvíjaný silikátový kompozit pre vyhrievanie budú podľa umiestnenia pôsobiť rôzne faktory. Jeho využitie je predpokladané pre vozovky v kritických miestach ako sú plochy križovatiek, plochy pred svetelnou signalizáciou, kde je potrebná rýchla zmena rýchlosti, plochy na zastávkach verejnej dopravy, kde môže dôjsť k úrazom, rampy umožňujúce vstup do podzemných objektov, mosty, kritické časti miestnych komunikácií pre peších, vrchné vrstvy strešných plášťov plochých striech a iné. Jedná sa o konštrukcie v exteriéri preto medzi hlavné faktory patrí predovšetkým vplyv vlhkosti, namáhanie zmenami teplôt, mrazové pôsobenie vody v prípade, že by došlo k prerušeniu prevádzky kompozitu, dynamické zaťaženie a podobne.

7.1.1 Vplyv vlhkosti

Stavebné materiály sa prakticky nevyskytujú v absolútne suchom stave. Zmeny vlhkosti spôsobujú objemové zmeny, ktoré sú príčinou zmien v napätí v materiáloch a tiež zmeny štruktúry materiálov, čím sú ovplyvnené ich mechanické a fyzikálne vlastnosti. [34]

Poklesom relatívnej vlhkosti prostredia, ktorý je úzko spätý so zmenou teploty majú pórovité materiály tendenciu zmrašťovať sa odparovaním vlhkosti. Odparenie kvapalnej vody a pokles nasýtenia pórov vedie k účinkom kapilárneho tlaku, ktorý vyvolá kontrakciu pevnej kostry. Ak dôjde k obmedzeniu zmraštenia, vzniká vnútorné napätie a po prekročení medznej pevnosti vznikajú trhliny. Zmrašťovanie je teda komplexný jav ovplyvnený relatívnou vlhkosťou a teplotou prostredia, ktorému je kompozit vystavený. [35]

7.1.2 Namáhanie zmenami teplôt

Na materiál môžu negatívne pôsobiť aj zmeny teploty prostredia. Pri experimentálnych štúdiách zameraných na zhoršenie mechanických vlastností vplyvom nerovnomernej deformácie v dôsledku rôznej tepelnej rozťažnosti bolo zistené, že pri bežných teplotách

(cykly 20 a 50 °C) sa pevnosť v tlaku silikátového kompozitu nezmenila. Pri extrémnejších teplotných cykloch (napríklad 25 a 70 °C, 20 a 80 °C) bol zistený pokles pevnosti v tlaku o 5 až 28,7 % oproti referenčnej vzorke. [36]

7.1.3 Mrazové pôsobenie vody

Pre úroveň deštruktívnych účinkov mrazového pôsobenia je dôležitá miera nasýtenia materiálu vodou a jeho mikroštruktúra. K defektom dochádza zmrazením vody (okrem chemicky viazanej) v póroch materiálu, čo vedie k nárastu jej objemu až o 1/11 (9 %) a tým k namáhaniu stien pórov kryštalickým tlakom ľadu. Bod tuhnutia vody v póroch sa znižuje so zmenšujúcim sa priemerom pórov. Pre cementové malty sa preukázalo zníženie vodného súčiniteľa (pod 0,36) alebo prídavok mikrosiliky ako priaznivé pre zabezpečenie mrazuvzdornosti (cykly -20 a 20°C). [37]

7.1.4 Dynamické zaťaženie

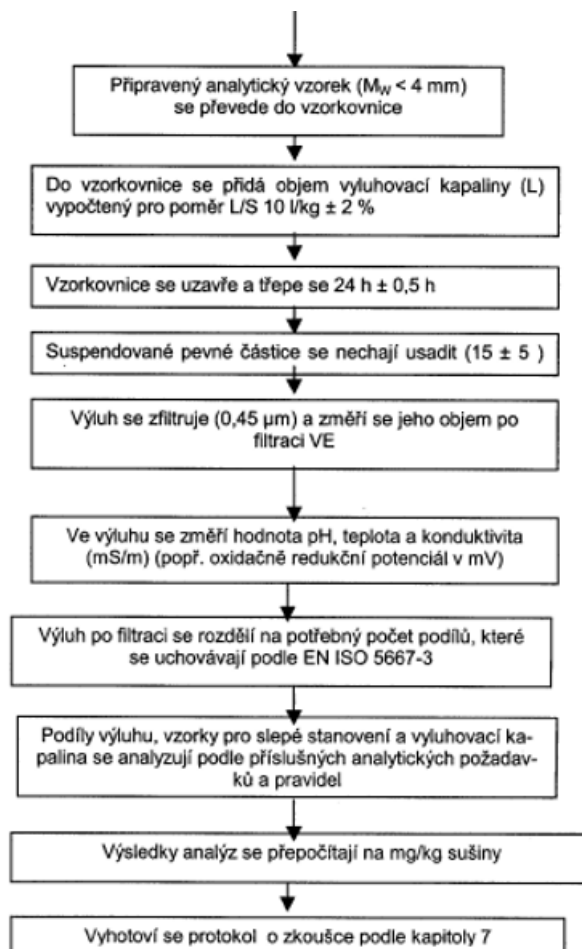
Cementové kompozity sa negatívne vyznačujú krehkosťou, nízkou pevnosťou v ťahu a horšími dynamickými mechanickými vlastnosťami. Tieto vlastnosti súvisia s pôsobením dynamickej sily pri rôznych teplotách a môžu byť charakterizované faktormi útlmu a dynamickými modulmi pružnosti. Dynamické vlastnosti závisia od podmienok zaťaženia, frekvencie vibrácií a podobne. V súčasnosti sa skúma modifikácia týchto vlastností cementových mált pomocou uhlíkových vlákien (CF), uhlíkových nanotrubičiek (CNT), oxidu grafénu (GO). [38]

7.1.5 Vylúhovateľnosť podľa ČSN EN 12457-2

Je vo všeobecnosti známe, že cementové kompozity nezvyknú nepriaznivo ovplyvňovať životné prostredie. Rovnako dôležitým poznatkom však je, že cementársky priemysel patrí k využívateľom recyklovaných odpadov a druhotných surovín ako sú napríklad popolčeky a trosky, pri ktorých je potenciálna vylúhovateľnosť škodlivých iónov v čase rizikom.

Skúška vylúhovateľnosti prebieha podľa normy ČSN EN 12457-2, ktorá platí pre materiály so zrnitosťou menšou ako 4 mm a sleduje najmä anorganické zložky. Podstatou skúšky je kontakt skúmanej vzorky s vylúhovacou kvapalinou, ustálenie úplnej alebo čiastočnej rovnováhy, vylúhovanie niektorých zložiek a po odstránení pevného zvyšku konečne stanovenie vlastností výluhu podľa príslušných noriem. Vzorka sa pred skúškou presieva, drtí a triedi, aby sa upravila jej zrnitosť, nesmie byť však pomletá a neodporúča sa ani sušenie, ktoré by mohlo výsledky skresliť. Po úprave

sa stanoví sušina vzorky a pripraví sa analytická vzorka pre vylúhovaciu skúšku. Vylúhovacia skúška prebieha pri presných navážkach vylúhovacej kvapaliny a analytickej vzorky po dobu 24 hodín v uzavretej vzorkovnici, pričom je zabezpečená jej homogenizácia. Časť schematického znázornenia postupu je na Obrázku 23. Požiadavky na výluh sú stanovené medzinárodnými normami ako napríklad *DIN EN 16192:2012-02*, kde sú sledované hodnoty pH a hmotnostná koncentrácia $As, Cd, Cr VI, Cu, Ni, Pb, Zn, Cl^-, NO_2^-, SO_4^{2-}$. [39] [40]



Obrázok 23 Časť schémy postupu podľa ČSN EN 12457-2 [40]

7.2 Požiadavky na parametre navrhovaného kompozitu pre vyhrievanie

Na vyvíjaný silikátový kompozit budú kladené požiadavky jednak z elektricky-vodivostného hľadiska za účelom vyhrievania a aj z hľadiska mechanických a deformačných vlastností.

7.2.1 Elektricky vodivostné vlastnosti

Pre tento súbor vlastností je dôležitá:

- Impedancia Z
- Výhrevnosť (viď nižšie spracovaná metodika)

7.2.1.1 Požiadavky na hodnotu impedancie navrhovanej hmoty

Na meranie impedancie bude použitý postup uvádzaný v norme ČSN EN 62561-7, s požadovanou hodnotou impedancie Z rovnej 100 Ω . Podrobnejšia metodika je uvedená v Kapitole 10.1.

7.2.1.2 Požiadavky na aspekty výhrevnosti navrhovanej hmoty

Výhrevnosť bude sledovaná podľa osobitnej metodiky podrobnejšie charakterizovanej v Kapitole 10.2. Hlavným posudzovaným parametrom bude vývoj teploty kompozitu v čase, pri konštantnej hodnote napätia a teplota, ktorú kompozit dosiahne po vystavení pôsobeniu elektrického prúdu. Energetické hľadisko bude popisovať činný výkon, získaný z parametrov napätia a prúdu na jednotlivých vzorkách. Kritériom je vzrast teploty kompozitu oproti vonkajšiemu prostrediu o minimálne 10 °C za čas prechodu prúdu maximálne 30 minút. Dosiahnutá teplota je limitovaná bodom varu vody pri atmosférickom tlaku (100 °C), a to pre potenciálne deštruktívne účinky vodnej pary expandujúcej v kompozite. Výška teploty by však mala byť prijateľná pre kontakt s biologickým prostredím (ľudským telom), preto by mala optimálna maximálna teplota dosahovať 50 °C.

7.2.2 Mechanické a deformačné vlastnosti

Z hľadiska mechanických a deformačných vlastností sú podstatné:

- Pevnosť v ťahu za ohybu
- Pevnosť v tlaku
- Zmraštenie (hlavne autogénne a vlhkostné)

7.2.2.1 Pevnosť v ťahu za ohybu podľa ČSN EN 196-1

Stanovenie bude prebiehať na telesách s rozmermi 40×40×160 mm namáhaním trojbodovým ohybom. Pevnosť v ťahu za ohybu sa potom vypočíta zo vzťahu (7.1).

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot l}{b \cdot h^2} \quad [MPa] \quad (7.1)$$

Kde R_f je pevnosť v ťahu za ohybu v MPa, F_f je zaťaženie pri zlomení telesa v N, l je vzdialenosť podpor v mm, b je šírka telesa v mm, h je výška telesa v mm. Výsledkom je pevnosť v ťahu za ohybu zaokrúhlená na 0,1 MPa. [41]

7.2.2.2 Pevnosť v tlaku podľa ČSN EN 196-1

Skúška prebieha na úlomkoch telies zo skúšky pevnosti v ťahu za ohybu. Použité je predpísané zariadenie s pomocnými doštičkami, ktoré zabezpečujú veľkosť tlačnej plochy 1600 mm². Pevnosť v tlaku sa potom vypočíta zo vzťahu (7.2)

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad [MPa] \quad (7.2)$$

Kde R_c je pevnosť v tlaku v MPa a F_c je zaťaženie pri porušení v N. Výsledkom je pevnosť v tlaku zaokrúhlená na 0,1 MPa. [41]

7.2.2.3 Autogénne zmrašťovanie

Zmrašťovanie spojené s procesom hydratácie cementu sa nazýva autogénne. Uvádza sa, že pri hodnotách vodného súčiniteľa menej ako 0,42 môže dochádzať k výraznému autogénnemu zmrašťovaniu a tým k vzniku trhlín. V práci zaoberajúcej sa autogénnym zmrašťovaním betónu boli zistené hodnoty 2500 μm/m pri vodnom súčiniteli 0,2 μm/m, kým pri vodnom súčiniteli 0,4 sa autogénne zmraštenia pohybovalo v rozmedzí 500 – 800 μm/m. Dôležitým faktorom pri tomto type zmraštenia je aj vek kompozitu. Platí, že v raných štádiách dochádza k najvýraznejšiemu zmrašťovaniu, ktoré sa v čase ustáli. [42] Autogénne zmrašťovanie je možné merať viacerými lineárnymi alebo objemovými metódami. Objemová metóda spočíva v umiestnení kompozitu do kaučukového balónika, ktorý sa zavesí a ponorí do kvapaliny so známou hustotou. Zmena objemu je vyhodnotená na základe zmeny tiaže balónika. Lineárne techniky spočívajú v umiestnení kompozitu do pevnej formy so znížením trením alebo do vlnitej trubice s nízkou pozdĺžnou tuhosťou, v ktorých je možné sledovať dĺžkové zmeny kompozitu. [43]

7.2.2.4 Vlhkostné zmrašťovanie

Zmrašťovanie v dôsledku migrácie vlhkosti v kapilárach sa označuje ako zmrašťovanie vlhkostné. Spolu s nízkou pevnosťou v ťahu je nevýhodou portlandských cementov. Vo všeobecnosti vedie k vzniku trhlín a problémom s trvanlivosťou. Uplatňuje sa najmä pri prvkoch, kde dochádza k vysychaniu len z jednej strany. Tento jav súvisí s gradientom vlhkosti a nadobudnutím vlhkostnej rovnováhy s okolím, pri lokálnom zmraštení ide o vlhkosť pórov a gradient deformácie zmraštením. [44]

Bežná hodnota zmraštenia cementového kameňa sa udáva v rozmedzí 500 – 800 $\mu\text{m}/\text{m}$ po 28 dňoch. Vo všeobecnosti na zmrašťovanie vplyva veľa činiteľov. Napríklad redukcia vodného súčiniteľa a objemu zapríčiňuje jeho zmiernenie, kým redukcia relatívnej vlhkosti prostredia má opačný efekt. Tento typ zmraštenia sa dá podľa zahraničnej štúdie stanoviť nalepením terčov v definovanej vzdialenosti na skúšobné telesá v podobe hranolov alebo valcov a sledovaním odchýlky, ktorá vzniká pri rôznych expozičných podmienkach. [44]

Podstatný vplyv má aj typ cementu. Napríklad pre puzolánové cementy bolo v horizonte 1350 dní zaznamenané zmraštenie sušením o 25 % vyššie ako pre portlandské cementy, kde sa zmraštenie sušením pohybovalo v medziach od 1000 – 1200 $\mu\text{m}/\text{m}$. Skúška prebehla podľa normy *ASTM C157* určenej pre zatvrdnuté cementové malty, v ktorej sa využívajú hranolové telesá vytvrdzované vo vápennej suspenzii. Telesá sa následne umiestňujú do normových stojanov a klimatizujú sa pri definovaných podmienkach. Stojany umožňujú voľné prúdenie vzduchu okolo vzoriek a meranie dĺžky. Okrem zmeny dĺžky telies sa stanovuje aj ich hmotnostný úbytok. [45]

7.2.2.5 Stanovenie objemových zmien betónu podľa ČSN 73 1320

Norma sa popisuje spôsob stanovenia zmrašťovania betónu na telesách 100×100×400 mm. Pre potreby navrhovanej hmoty vzhľadom na veľkosť zŕn plniva sú uvažované telesá rozmerov 40×40×160 mm. Zmraštenie je stanovené ako pomerné dĺžkové pretvorenie hranolov v konkrétnom čase, pričom skúška sa väčšinou ukončí pri dosiahnutí rozdielu prírastku medzi meraniami menej ako 5 %. Vyhodnotenie spočíva vo výpočte zmraštenia zo vzťahu (7.3).

$$\varepsilon_{s,n} = \frac{z_n - z}{z} \cdot 1000 = \frac{\Delta z_n}{z} \cdot 1000 \quad [\text{‰}] \quad (7.3)$$

Kde $\varepsilon_{s,n}$ je zmraštenie v ‰, Δz_n je dĺžková zmena mernej základne oproti východiskovému stavu v mm, z_n je zmeraná dĺžka základne v n-tý deň merania v mm, z je východzia dĺžka základne v mm. [46]

Tabuľka 2 Tabelárne zhrnutie požadovaných parametrov a skúšobných metód pre návrh vodivého silikátového kompozitu pre vyhrievanie

Funkčná vlastnosť	Požiadavka	Skúšobná metóda
Impedancia Z	100 Ω po 7 dňoch	ČSN EN 62561-7
Výhrevnosť	≥ 10 °C/30 min, $t_{\max} = 100$ °C	Osobitná metodika
Pevnosť v tlaku R_c	≥ 15 MPa po 7 dňoch	ČSN EN 196-1
Pevnosť v ťahu za ohybu R_f	≥ 4 MPa po 7 dňoch	ČSN EN 196-1

7.3 Zhrnutie Etapy I

V prvej etape boli vymenované a popísané hlavné účinky namáhania od prostredia, ktorému môže byť kompozit vystavený. Ďalej boli stanovené vybrané postupy na hodnotenie jeho vlastností. Ako bolo uvedené, za dosiahnutie požadovanej elektrickej vodivosti bude považovaná hodnota impedancie Z 100 Ω , výhrevnosť bude determinovaná vývojom teploty kompozitu v čase s kritériom minimálne 10 °C/30 min a maximálnou dosiahnutou teplotou 100 °C, ideálne však do 50 °C. Indikátorom výkonu získaného elektrického poľa bude hodnota činného výkonu jednosmerného prúdu. Z ukazovateľov mechanických vlastností bude hodnotená ako minimálna 7 denná pevnosť v tlaku 15 MPa a pevnosť v ťahu za ohybu 4 MPa. Hodnoty vychádzajú z ČSN EN 1504-3 [47], ktorá popisuje vysprávkové malty bez nosnej funkcie. Objemové zmeny budú posudzované v ďalšom výskume zaoberajúcom sa problematikou vyhrievaných kompozitov. Zhrnutie požadovaných parametrov pre túto prácu obsahuje Tabuľka 2.

8 ETAPA II: ANALÝZA VSTUPNÝCH SUROVÍN PRE NÁVRH SILIKÁTOVÉHO KOMPOZITU PRE VYHRIEVANIE

Táto kapitola bude venovaná prehľadu potenciálne vhodných vstupných surovín pre návrh receptúry silikátového kompozitu pre vyhrievanie. Suroviny budú delené na spojivá a plnivá. Plnivá budú ďalej rozdelené podľa funkcie, ktorú majú v kompozite zohrávať. Pri plnivách s vodivou funkciou bude poskytnutý prehľad tiež druhotných materiálov, keďže vybrané primárne vyrábané materiály boli obsiahnuté v Kapitole 3 teoretickej časti. Nasledovať budú analýzy vodivostných parametrov surovín a v závere etapy bude zvolená vhodná kombinácia na základe dosiahnutých poznatkov.

8.1 Spojivá

Keďže sa jedná o silikátový kompozit, bude použitým spojivom cement. Dôležitým krokom je výber druhu cementu. Na základe stanovených požiadaviek v Etape I sa musí jednať o taký cement, ktorý by ideálne podporil vodivosť kompozitu, prípadne ju aspoň výrazne neznižoval. V kompozite by malo dôjsť k vzniku Joulovho tepla v dôsledku zvýšenej vodivosti a prechodu elektrického prúdu.

V publikovaných štúdiách zaoberajúcich sa vývojom elektricky vodivých cementových mált a betónov sa z hľadiska elektrickej vodivosti ako najpoužívanejší javil portlandský cement. V štúdií porovnávajúcej okrem iného aj elektrickú vodivosť cementových mált s rôznymi druhmi prímiesí, ktoré sa používajú aj v portlandských zmesových cementoch, sa ako najvýhodnejšia javila receptúra obsahujúca iba portlandský cement. [48]

Ďalšími požiadavkami sú čo najpriaznivejšie pevnosti a najnižšie objemové zmeny. Z týchto predpokladov prichádza do úvahy použitie portlandských a portlandských zmesových cementov, prípadne použitie prímiesí vo forme vysokoteplotného popoľčka s vyššou stratou žíhaním, ktorá by mohla prispieť k zvýšeniu vodivosti kompozitu. V prípade použitia zmesových cementov by mohlo dôjsť k ovplyvneniu nárastov pevností v čase a tiež negatívne ovplyvneniu impedancie kompozitu, preto nebudú v tejto práci používané.

8.1.1 Portlandský cement CEM I 42,5 R

Zloženie tohto typu cementu bolo popísané v Kapitole 2.1.2.1 teoretickej časti. Portlandský cement sa bežne využíva na výrobu prostých, predpäťých betónov aj železobetónov a rôznych druhov mált. Je charakteristický rýchlym nárastom pevností, s vysokou počiatočnou aj konečnou pevnosťou. Ukážku cementu od výrobcu

Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrá obsahuje Obrázok 24 a vybrané technické parametre uvádzané výrobcom Tabuľka 3.



Obrázok 24 Cement CEM I 42,5 R Mokrá [foto autora]

Tabuľka 3 Technické parametre – CEM I 42,5 R Mokrá [49]

Pevnosť v tlaku [MPa]		Pevnosť v ťahu za ohybu [MPa]		Merný povrch [m ² /kg]	Merná hmotnosť [kg/m ³]
7 dní	28 dní	7 dní	28 dní		
50,3	59,7	8,1	9,2	391	3110

8.1.2 Vysokoteplotný popolček

Klasický popolček je pozostatok spaľovania mletého uhlia pri teplotách od 1200 do 1500 °C. Je tvorený jemnými prevažne guľovitými zrnami, ktoré sú z kotla unášané spalinami a získavané sú väčšinou na elektrostatických odlučovačoch. Jeho zloženie určuje kvalita spaľovaného uhlia. Popolčeky sa s výhodou používajú ako náhrada cementu pre svoje puzolánové vlastnosti. [50] Z hľadiska vybraných všeobecných technických parametrov hodnotí popolček Tabuľka 4. Ukážka vysokoteplotného popolčeka firmy *Bukocel, a.s.* je na Obrázku 25.



Obrázok 25 Vysokoteplotný popolček [51]

Tabuľka 4 Technické parametre – vysokoteplotný popolček [51]

Sypná hmotnosť voľne sypaná [kg/m ³]	Objemová hmotnosť (pyknometricky) [kg/m ³]	Merný povrch [m ² /kg]	Veľkosť zŕn [μm]
800-1100	2000-2500	250-550	10-30

Pre potenciálne zníženie impedancie a vznik Joulovho tepla je predpokladané využitie popolčekov s vyššou stratou žíhaním (nedopalom), na čo poukazuje jeden z výsledkov diplomovej práce venovanej vývoju elektricky vodivých kompozitov na báze druhotných surovín, kde bola dosiahnutá o tri rády nižšia impedancia pri popolčeku s nedopalom 22% oproti popolčeku s nedopalom 5%. [52]

8.2 Plnivá

Plnivá sa do kompozitov pridávajú jednak za účelom vytvorenia pevného skeletu, ktorý je pri vhodnej zrnitosti a spojení nositeľom mechanických vlastností materiálu, a tiež za účelom dosiahnutia špecifických vlastností, ktorým je v tomto prípade zvýšenie elektrickej vodivosti kompozitu. V tejto podkapitole budú popisované plnivá referenčné – kremičitý piesok a plnivá s elektricky vodivým potenciálom. Prehľad a následný výber sa bude sústrediť najmä na druhotné suroviny, pre snahu znížiť environmentálnu záťaž hromadenia vedľajších produktov priemyselnej výroby.

8.2.1 Referenčné plnivo – Kremičitý piesok

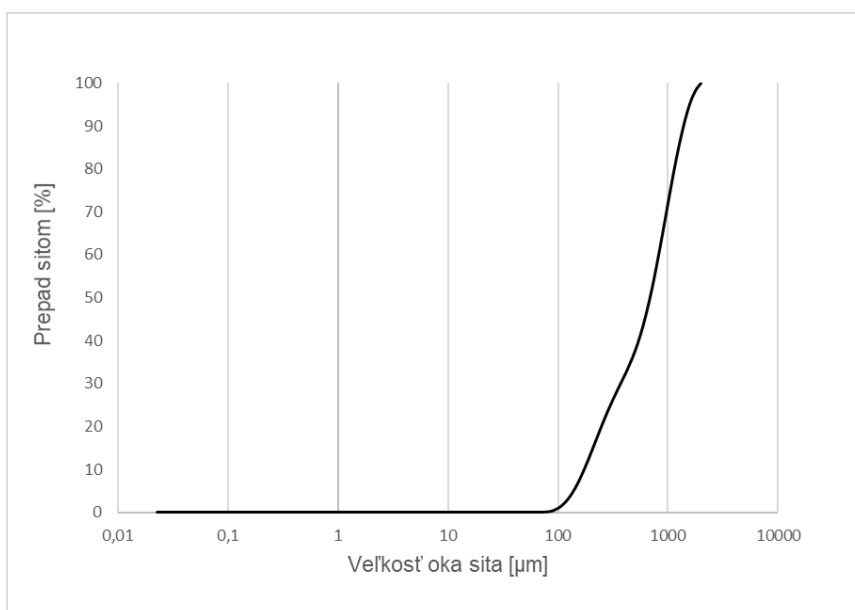
Na účel výroby referenčných telies sa využíva normová forma kremičitého piesku, označovaná ako CEN referenčný piesok. Charakteristické je podľa ČSN EN 196-1 [41] jeho špecifické rozdelenie zrnitosti od 0,08 do 2 mm, obsah minimálne 98 % SiO₂ a maximálna vlhkosť 0,2 %. Normový piesok je dostupný vo vreckách s hmotnosťou 1350 (± 5) g. Technické parametre obsahuje Tabuľka 5, granulometriu Graf 1 a ukážka je Obrázku 26. Piesok, ako kamenná frakcia, má v kompozite vytvárať skelet, ktorý sa podieľa na výsledných mechanických vlastnostiach.



Obrázok 26 CEN normový piesok [foto autora]

Tabuľka 5 Technické parametre – CEN piesok

Sypná hmotnosť voľne sypaná [kg/m ³]	Hustota zŕn [kg/m ³]
1700	2650



Graf 1 Granulometria – normový piesok

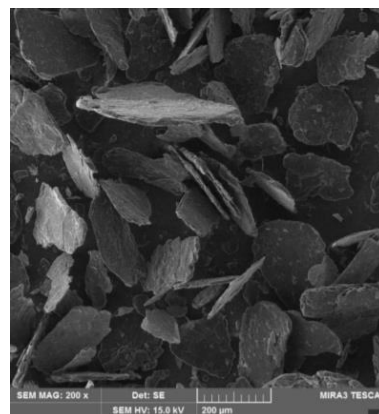
8.2.2 Primárne vodivé plnivá

8.2.2.1 Supragraphite C300

Tento grafitový prach má prírodný pôvod a ide o vločkový grafit vyrábaný v Južných Čechách firmou *Epinikon a.s.* Obsah uhlíka je minimálne 99,5 % zvyšok je tvorený popolom. Podľa údajov výrobcu má 60 – 80 % častíc veľkosť zrna minimálne 100 μm. [52] Ukážka tohto grafitového prášku je na Obrázku 27 a na Obrázku 28 je jeho mikroskopická snímka. Technické parametre uvádza Tabuľka 6.



Obrázok 27 Supragraphite C300
1 diel = 1 mm [52]



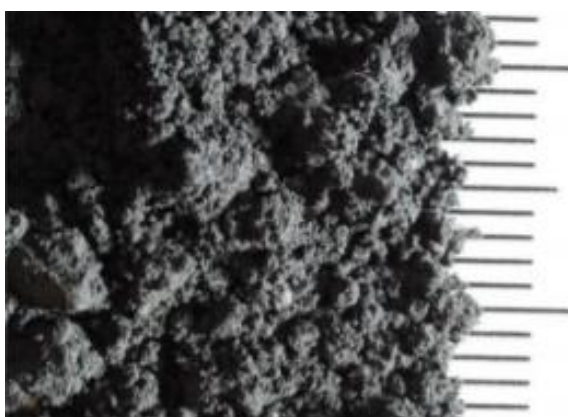
Obrázok 28 SEM snímka
Supragraphite C300 [52]

Tabuľka 6 Technické parametre – Supragraphite C300 [52]

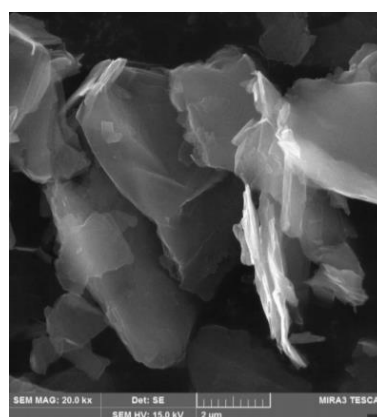
Sypná hmotnosť voľne sypaná [kg/m ³]	Objemová hmotnosť (pyknometricky) [kg/m ³]	Merný povrch [m ² /kg]	Impedancia [Ω]
450	2200	1194	0,14

8.2.2.2 Micrographite UC4

Ide o mikro mletý grafitový prach syntetického pôvodu. Obsah uhlíka je minimálne 99,0 % zvyšok je tvorený popolom. Podľa údajov výrobcu *Epinikon a.s.* je veľkosť zrna častíc 3,5 – 5,0 µm. [52] Ukážka tohto grafitového prášku je na Obrázku 29 a na Obrázku 30 je jeho mikroskopická snímka. Technické parametre uvádza Tabuľka 7.



Obrázok 29 Micrographite UC4
1 diel = 1 mm [52]



Obrázok 30 SEM snímka
Micrographite UC4 [52]

Tabuľka 7 Technické parametre – Micrographite UC4 [52]

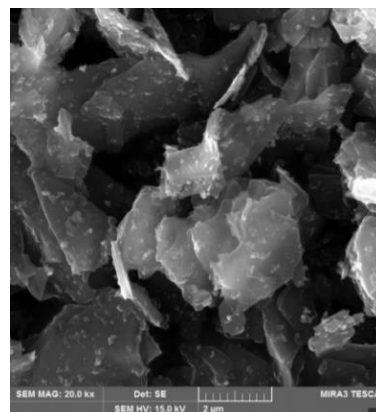
Sypná hmotnosť voľne sypaná [kg/m ³]	Objemová hmotnosť (pyknometricky) [kg/m ³]	Merný povrch [m ² /kg]	Impedancia [Ω]
170	2060	12454	0,89

8.2.2.3 Condufit C4

Grafitový prach Condufit C4 je mikro mletý grafit prírodného pôvodu. Podľa výrobcu *Epinikon a.s.* má vylepšené vodivostné vlastnosti. Obsah uhlíka je minimálne 99,5 % zvyšok je tvorený popolom. Podľa údajov výrobcu má 50 % častíc veľkosť zrna 3,5 – 5,5 µm. [52] Ukážka tohto grafitového prášku je na Obrázku 31 a na Obrázku 32 je jeho mikroskopická snímka. Technické parametre uvádza Tabuľka 8.



Obrázok 31 Condufit C4
1 diel = 1 mm [52]



Obrázok 32 SEM snímka
Condufit C4 [52]

Tabuľka 8 Technické parametre – Condufit C4 [52]

Sypná hmotnosť voľne sypaná [kg/m ³]	Objemová hmotnosť (pyknometricky) [kg/m ³]	Merný povrch [m ² /kg]	Impedancia [Ω]
180	2100	20418	1,46

8.2.3 Druhotné vodivé plnivé

8.2.3.1 Pyrolýzny koks

Tuhý zbytok pyrolýzneho spaľovania má formu koksu alebo aktívneho uhlíka. Je uhlíkovým pozostatkom pyrolýznych procesov (procesy tepelného rozkladu materiálov na organickej báze bez prístupu kyslíka). Štruktúra zbytku závisí na pôvodnej surovine, vysoká výťažnosť je dosahovaná pomalou pyrolýzou s nižšou teplotou. V pyrolýznom

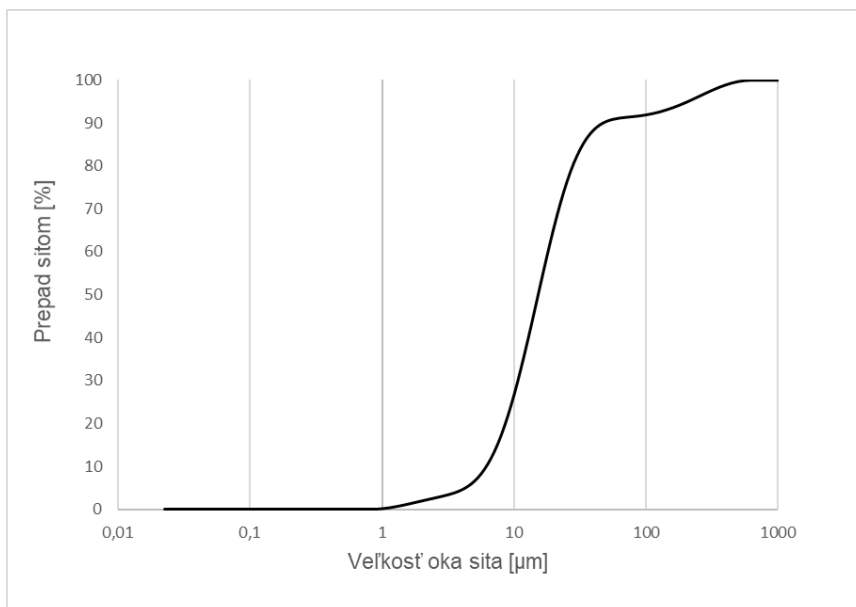
kokse zo spaľovania drevených peliet môže obsah uhlíka v organickej forme dosahovať až 60 až 80 %. [53] [54] Ukážka pyrolýzneho koksu je na Obrázku 33. Technické parametre uvádza Tabuľka 9 a granulometriu Graf 2.



Obrázok 33 Pyrolýzny koks [foto autora]

Tabuľka 9 Technické parametre – pyrolýzny koks

Sypná hmotnosť voľne sypaná [kg/m ³]	Hustota zŕn [kg/m ³]	Impedancia [Ω]
360	1960	3,44



Graf 2 Granulometria – pyrolýzny koks

8.2.3.2 Petrolejový koks

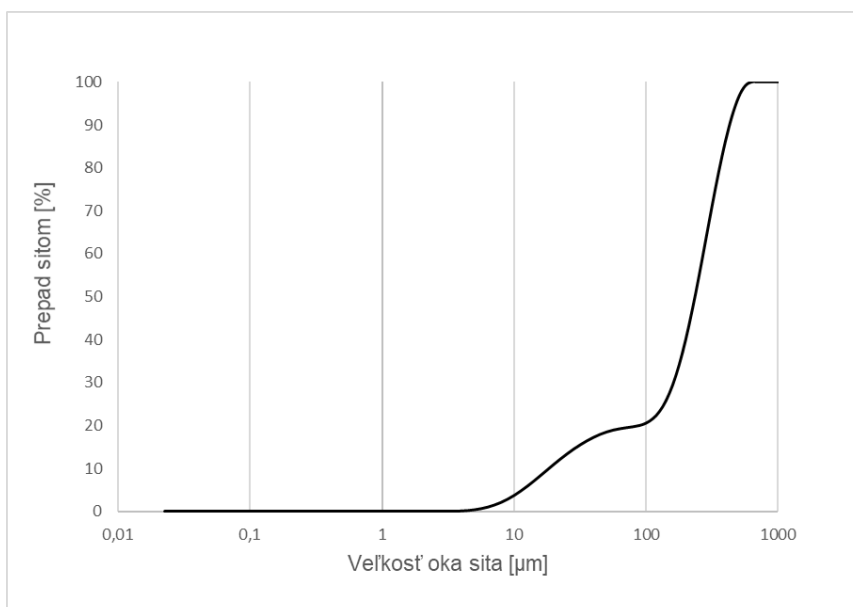
Petrolejový koks, tiež označovaný ako ropný, patrí k vedľajším produktom vznikajúcim pri rafinácii ropy. Ide o tuhý zbytok, obsahujúci nečistoty, preto sa nedá v surovom stave využiť v metalurgii. Pre jeho ďalšie použitie sa kalcinuje, kedy dochádza k odstráneniu prchavých uhľovodíkov a takto upravený obsahuje 97 – 99,5 % uhlíka. [55] Ukážka petrolejového koksu je na Obrázku 34. Technické parametre uvádza Tabuľka 10 a granulometriu Graf 3.



Obrázok 34 Petrolejový koks [foto autora]

Tabuľka 10 Technické parametre – petrolejový koks

Sypná hmotnosť voľne sypaná [kg/m ³]	Hustota zŕn [kg/m ³]	Impedancia [Ω]
1000	2100	2,40



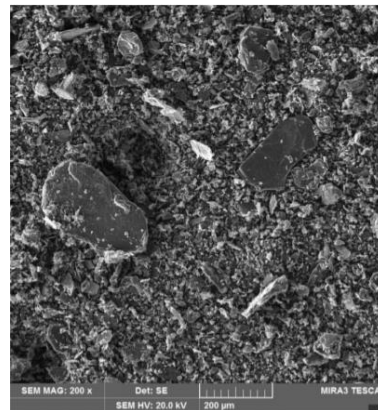
Graf 3 Granulometria – petrolejový koks

8.2.3.3 Odpadný grafitový prach „filter mazačka“

Tento grafitový prach odpadného charakteru je z hľadiska zloženia zmesou jemných grafitových prachov s malým obsahom prachových nečistôt ako môže byť celulóza. Producentom je *Epinikon a.s.* [52] Ukážka tohto grafitového prášku je na Obrázku 35 a na Obrázku 36 je jeho mikroskopická snímka. Technické parametre uvádza Tabuľka 11 a granulometriu Graf 4.



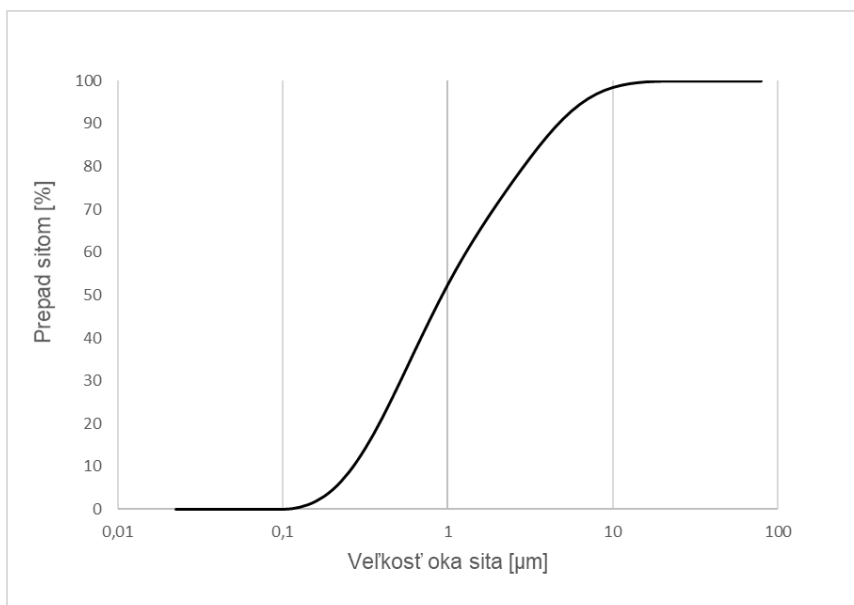
Obrázok 35 Odpadný grafitový prach „filter mazačka“ 1 diel = 1 mm [52]



Obrázok 36 SEM snímka odpadný grafitový prach „filter mazačka“ [52]

Tabuľka 11 Technické parametre – „filter mazačka“ [52]

Sypná hmotnosť voľne sypaná [kg/m ³]	Objemová hmotnosť (pyknometricky) [kg/m ³]	Impedancia [Ω]
450	2310	0,40



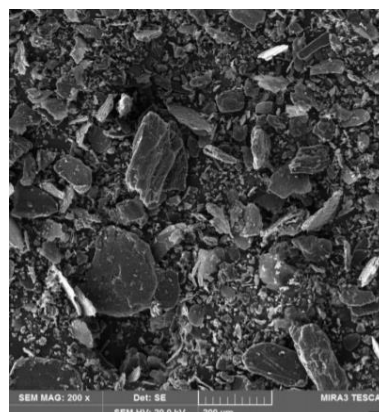
Graf 4 Granulometria – odpadný grafitový prach „filter mazačka“

8.2.3.4 Odpadný grafitový prach „vysávač“

Odpadný grafitový prach „vysávač“ je získavaný z priemyselných priestorov firmy *Epinikon a.s.*, kde je vysávaný z podláh výrobných hál. Pri tomto odpadnom grafitu je predpokladaný výskyt viacerých druhov grafitu a tiež výskyt iných prachových nečistôt. [52] Ukážka tohto grafitového prášku je na Obrázku 37, na Obrázku 38 je jeho mikroskopická snímka. Technické parametre uvádza Tabuľka 12 a granulometriu Graf 5.



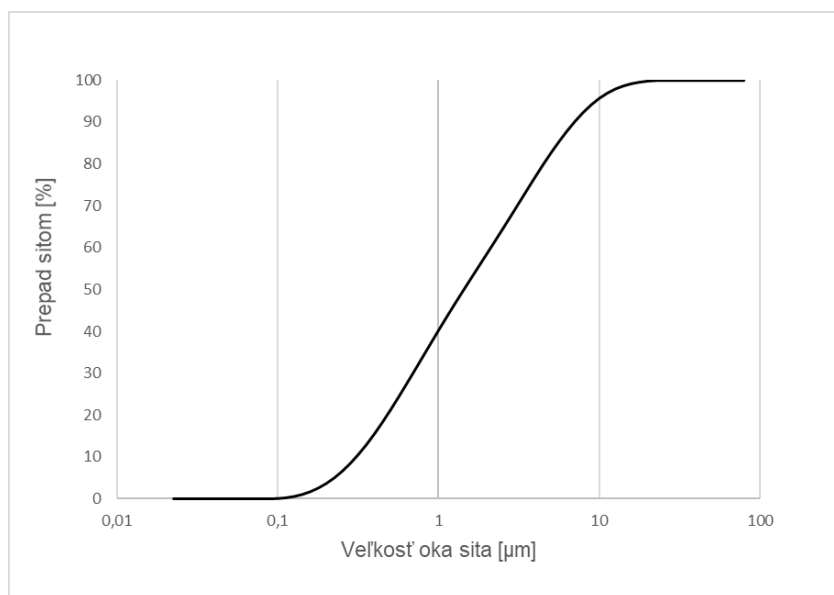
Obrázok 37 Odpadný grafitový prach „vysávač“ 1 diel = 1 mm [52]



Obrázok 38 SEM snímka odpadný grafitový prach „vysávač“ [52]

Tabuľka 12 Technické parametre – „vysávač“ [52]

Sypná hmotnosť voľne sypaná [kg/m ³]	Objemová hmotnosť (pyknometricky) [kg/m ³]	Impedancia [Ω]
440	2080	0,37



Graf 5 Granulometria – odpadný grafitový prach „vysávač“

8.2.3.5 Odpadné oceľové drôtky

Odpadné oceľové vlákna vo forme drôtikov vznikajú pri výrobe oceľových vlákien do betónu v spoločnosti *KrampeHarex*. Ide o odpadné vlákna z ušľachtilej ocele s pevnosťou v ťahu 1100 MPa a obdĺžnikovým prierezom. [56] Ukážka obsahuje Obrázok 39 a technické parametre uvádza Tabuľka 13.



Obrázok 39 Odpadné oceľové drôtky [foto autora]

Tabuľka 13 Technické parametre – „odpadné oceľové drôtky“

Sypná hmotnosť voľne sypaná [kg/m ³]	Ø Dĺžka vlákien [mm]	Ø Šírka vlákien [mm]	Ø Hrúbka vlákien [mm]
1350	19,79	1,72	0,44

8.3 Analýzy vlastností ovplyvňujúcich elektrickú vodivosť

Vybrané analýzy by mohli poskytnúť konkrétnejšie informácie o elektrickej vodivosti surovín, ktoré by mali zabezpečiť požadovanú impedanciu kompozitu.

8.3.1 TOC (Total organic carbon) - Celkový obsah organického uhlíka

Analýza obsahu organického uhlíka (TOC) je typická pre analýzu odpadných vôd, kde poskytuje informáciu o organickom znečistení. Rovnako dôležitým parametrom je aj obsah organického uhlíka v tuhých materiáloch, hlavne z hľadiska odpadového hospodárstva a kontroly kvality materiálov ako sú popolčky, troska alebo cementy. TOC určuje kvalitu spaľovacieho procesu, pričom reprezentuje uhlíkový nedopal. Uhlík v nezoxidovanej forme je potom potenciálnym zdrojom elektrickej vodivosti. Meranie TOC je možné priamym alebo nepriamym spôsobom. Základom je pri tom premeniť rôzne formy uhlíka na jednoduchú ako je napríklad CO_2 , ktorý sa dá potom kvantitatívne

zmerať. Jednou z priamych metód merania je oxidácia organického uhlíka (OC) suchým spaľovaním pri súčasnom rozklade minerálneho uhlíka (IC) v peci s nadbytkom O_2 . Dochádza tu k prevedeniu OC na CO_2 , ktorý je zaznamenaný napríklad gravimetricky. [57]

8.3.2 Vlastná impedancia vodivých plnív

Pre dosiahnutie požadovanej elektrickej vodivosti kompozitu je potrebné vybrať vodivé plnivá s nízkou impedanciou. Meranie vlastnej impedancie je výhodné pre overenie vlastností, ktoré sú od plniva očakávané a taktiež pre porovnanie jednotlivých plnív medzi sebou. Pre meranie impedancie práškových plnív neexistuje normový predpis, preto musí byť použitá samostatná metodika.

Vlastná metodika bude vychádzať z metodiky použitej v diplomovej práci zaoberajúcej sa vývojom elektricky vodivých kompozitov na báze druhotných surovín. [52] Táto metodika je určená pre práškové plnivá a je vytvorená s ohľadom na jednoduchú opakovateľnosť stanovenia. Zmena bude spočívať v dosiahnutí zhutnenia suroviny, pričom bude využitý zaťažovací lis vyvíjajúci tlak 100 N.

Meranie vlastnej impedancie plnív podľa samostatnej metodiky

Pre účel merania boli vyrobené pomôcky, ktoré sa pripojili k zariadeniu na meranie impedancie. Merací prípravok bol vytvorený pomocou 3D tlače z PETG plastu, ktorý je nevodivý. Meracia komora má šírku 1 cm a hĺbku 5 cm. Do prípravku sú umiestnené elektródy v protiahlej polohe a so vzdialenosťou 8 cm. Pomocou týchto elektród je potom meraná impedancia suroviny. [52]

Pomôcky:

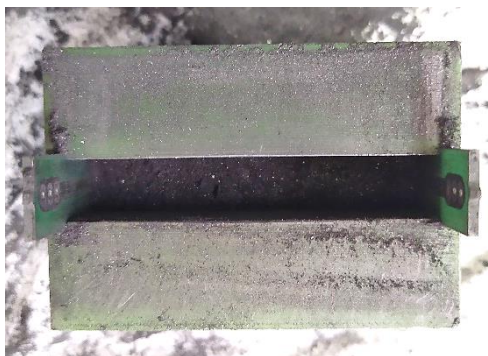
- Merací prípravok s elektródami (ukážka na Obrázku 40)
- Laboratórny lis so zaťažovacími doskami, vyvíjajúci tlak 100 N (ukážka na Obrázku 42)
- Meracie zariadenie GW Instek LCR-6020 zaznamenávajúce impedanciu Z [Ω] a uhol fázového posunu φ [$^\circ$] [52]



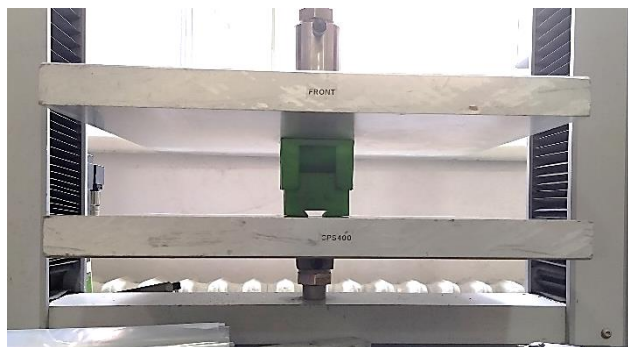
Obrázok 40 Ukážka meracieho prípravku s elektródami vľavo, vpravo hore ukážka elektród a vpravo dole naplnený prvok pripravený na umiestnenie do lisu [52] [foto autora]

Postup:

Vzorka sa umiestni do prípravku s elektródami a zľahka sa pritlačí dusadlom. Miera zaplnenia prípravku vzorkou je po pritlačení dusadlom približne 70 %, ako vidno na Obrázku 41. Na prípravok sa umiestni vrchný diel a celý prvok sa centricky umiestni do lisu podľa Obrázku 42. Lisom sa vyvinie na vrchný diel tlaková sila 100 N. Na takto pripravenú a zaťaženej vzorku sa pomocou zariadenia GW Instek LCR-6020 zmeria vlastná impedancia práškovej suroviny priložením meracích elektród prístroja na vrchnú časť elektród prípravku.



Obrázok 41 Ukážka zaplnenia komory po ľahkom zhutnení dusadlom [foto autora]



Obrázok 42 Zaťaženie prípravku v lise [foto autora]

8.4 Posúdenie kompatibility surovín

Pre zabezpečenie považovanej funkčnosti kompozitu musia byť suroviny navzájom kompatibilné. Vzhľadom na to, že sa jedná o suroviny, pri ktorých nie je predpokladaná

prítomnosť alkálií, síranov alebo chloridov, nemal by nastať problém so vzájomnou interakciou plnív.

Pri snahe využiť odpadné oceľové drôtičky je dôležitým aspektom ich možná korózia vplyvom vlhkosti v čase. Potenciálom využitia týchto surovín, vplyvom prípadnej korózie na impedanciu a následne aj výhrevnosť kompozitu sa bude zaoberať ďalší výskum v tejto oblasti.

8.5 Zhrnutie Etapy II

V Etape II boli popísané vybrané vstupné suroviny rozdelené do kategórií podľa účelu a uvedené analýzy surovín, ktoré by mohli pomôcť pri výbere vhodného zloženia.

Na základe poznatkov z teoretickej časti práce a prvých dvoch etáp praktickej časti bolo vybrané nasledujúce surovinové zloženie.

Pre spojivovú zložku bude použitý portlandský cement CEM I 42,5 R pre jeho uspokojivé počiatkové a konečné pevnosti zabezpečujúce požadované mechanické vlastnosti a nižšie ekonomické náklady v porovnaní s CEM I 52,5 R. Alternatívne by stálo za zváženie použitie cementu s popolčekom alebo náhrada časti cementu popolčekom, pre zníženie ekonomickej náročnosti a potenciál prispieť k zníženiu impedancie kompozitu. V tomto prípade by však pravdepodobne došlo k pozvoľnejšiemu nábehu pevností kompozitu, čo pre účel laboratórnych skúšok v tejto práci nie je žiadúce.

Ako plnivo s referenčnou funkciou bude použitý kremičitý piesok v normovej podobe CEN piesku hlavne pre možnosť porovnania stanovovaných vodivostných vlastností.

Vodivú zložku znižujúcu impedanciu pre účely vyhrievania kompozitu bude z primárnych uhlíkových vodivých plnív zabezpečovať grafitový prach Condufit C4. Hoci spomedzi primárnych grafitových surovín dosahuje najvyššiu vlastnú impedanciu, v diplomovej práci zaoberajúcej sa vývojom elektricky vodivých kompozitov na báze druhotných surovín [52] dosahoval po pridaní do kompozitu najnižšie hodnoty impedancie pri výhodných mechanických vlastnostiach.

Z druhotných vodivých uhlíkových plnív bude vybratý odpadný grafitový prach „vysávač“. Výber spočíval v porovnaní vlastných impedancií plnív, kde odpadný grafitový prach „vysávač“ dosiahol nižšiu hodnotu v porovnaní s odpadným grafitovým prachom „filter mazačka“. Spomedzi druhotných koksových plnív bude použitý rovnako na základe nižšej vlastnej impedancie petrolejový koks. Hlavným dôvodom výberu vodivých plnív na základe ich vlastnej impedancie je fakt, že impedancia samotných plnív sa bude významne podieľať na výslednej impedancii, respektíve vodivosti kompozitu.

Pre lepšiu homogenizáciu zmesi a dosiahnutie prijateľného množstva zámesovej vody, najmä pri prídavku vodivých plnív, bude použitá plastifikačná prísada.

9 ETAPA III: VOĽBA MATERIÁLOVÉHO ZLOŽENIA PRE PRÍPRAVU SILIKÁTOVÉHO KOMPOZITU PRE VYHRIEVANIE

Náplňou Etapy III je návrh konkrétnych receptúr zo surovín zvolených v závere Etapy II praktickej časti. Receptúry budú posudzované vzhľadom na referenčnú receptúru bez vodivých plnív, aby bolo možné zhodnotiť vplyv vodivých plnív na elektrickú vodivosť a s ňou súvisiacu schopnosť výhrevnosti kompozitu. Referenčná receptúra vychádza z normovej receptúry podľa ČSN EN 196-1 pre výrobu telies na skúšky cementu. Zvolená bola pre jednoduchosť stanovenia mechanických vlastností a jemnozrnnosť kompozitu.

Pre funkčnosť a čo najobjektívnejšie výsledky je dôležité klásť dôraz na homogenizáciu surovín, pretože ich nerovnomernosť v kompozite by mohla mať významný vplyv na výsledky pozorovaní. S homogenizáciou súvisí aj frakcia použitých plnív, pred aplikáciou bude v prípade potreby zrnitosť uhlíkových plnív upravená na maximálnu veľkosť zrna 2 mm.

Navrhnuté budú spolu s referenčnou štyri receptúry, pričom receptúry s vodivou zložkou budú disponovať jej rovnakým celkovým percentuálnym obsahom, a to v dvoch množstevných variantoch. V prípade týchto receptúr je predpokladaná zvýšená potreba zámesovej vody vplyvom nárastu potrebného zmáčaného povrchu. Pre čiastočné zníženie zámesovej vody, ktorá by mohla mať vo vysokých množstvách značný vplyv na mechanické a deformačné vlastnosti výsledných vzoriek, bude použitá plastifikačná prísada na báze lignínsulfonanov CHRYSO®Plast 461.

9.1 Návrh receptúr

9.1.1 Receptúra REF

Referenčná receptúra tvorí základ pre návrh ďalších receptúr pri zachovaní celkového pomeru spojiva a plniva, pričom v ďalších receptúrach bude okrem plniva v podobe kremičitého piesku zahrnutá aj vodivá fáza.

Spojivom je pri referenčnej receptúre portlandský cement CEM I 42,5 R. Plnivo tvorí normová podoba kremičitého piesku CEN. Zastúpenie surovín zodpovedá normovému zloženiu pre výrobu troch telies na skúšky pevnosti cementu. Obsah je daný 1 dielom cementu (450 ± 2 g), 3 dielmi normalizovaného piesku (1350 ± 5 g) a 0,5 dielom vody (225 ± 1 g). Tabelárne vyobrazuje receptúru Tabuľka 14.

Tabuľka 14 Zloženie receptúry REF

Receptúra REF		
Vstupná zložka	% podiel	Obsah
CEM I 42,5 R	[% hm. suchej zmesi]	25%
Kremičitý piesok CEN	[% hm. suchej zmesi]	75 %
Vodný súčiniteľ 0,50		

9.1.2 Receptúra CON

Receptúra je navrhnutá na základe receptúry REF, pričom okrem kremičitého piesku je prítomná aj funkčná zložka plniva – grafitový prach Condufit C4. Množstvo funkčnej zložky predstavuje 10 a 15 % suchej zmesi. Pre dosiahnutie vhodnej konzistencie je pridaná plastifikačná prísada. Tabelárne popisuje variant receptúry s obsahom 10 % funkčnej zložky Tabuľka 15 a variant receptúry s obsahom 15 % funkčnej zložky Tabuľka 16.

Tabuľka 15 Zloženie receptúry CON10 s obsahom 10 % vodivej zložky

Receptúra CON10		
Vstupná zložka	% podiel	Obsah
CEM I 42,5 R	[% hm. suchej zmesi]	25%
Kremičitý piesok CEN	[% hm. suchej zmesi]	65 %
Condufit C4	[% hm. suchej zmesi]	10 %
Plastifikačná prísada	[% hm. cementu]	2 %
Vodný súčiniteľ 0,85		

Tabuľka 16 Zloženie receptúry CON15 s obsahom 15 % vodivej zložky

Receptúra CON15		
Vstupná zložka	% podiel	Obsah
CEM I 42,5 R	[% hm. suchej zmesi]	25%
Kremičitý piesok CEN	[% hm. suchej zmesi]	60 %
Condufit C4	[% hm. suchej zmesi]	15 %
Plastifikačná prísada	[% hm. cementu]	2 %
Vodný súčiniteľ 1,44		

9.1.3 Receptúra VYS

Receptúra je navrhnutá na základe receptúry REF, plnivom je okrem kremičitého piesku aj vodivá zložka – odpadný grafitový prach „vysávač“. Vodivá zložka predstavuje 10 a 15 % suchej zmesi. Pre dosiahnutie vhodnej konzistencie je pridaná plastifikačná prísada. Tabelárne popisuje variant receptúry s obsahom 10 % vodivej zložky Tabuľka 17 a variant receptúry s obsahom 15 % vodivej zložky Tabuľka 18.

Tabuľka 17 Zloženie receptúry VYS10 s obsahom 10 % vodivej zložky

Receptúra VYS10		
Vstupná zložka	% podiel	Obsah
CEM I 42,5 R	[% hm. suchej zmesi]	25%
Kremičitý piesok CEN	[% hm. suchej zmesi]	65 %
Grafitový prach „vysávač“	[% hm. suchej zmesi]	10 %
Plastifikačná prísada	[% hm. cementu]	2 %
Vodný súčiniteľ 0,69		

Tabuľka 18 Zloženie receptúry VYS15 s obsahom 15 % vodivej zložky

Receptúra VYS15		
Vstupná zložka	% podiel	Obsah
CEM I 42,5 R	[% hm. suchej zmesi]	25%
Kremičitý piesok CEN	[% hm. suchej zmesi]	60 %
Grafitový prach „vysávač“	[% hm. suchej zmesi]	15 %
Plastifikačná prísada	[% hm. cementu]	2 %
Vodný súčiniteľ 0,85		

9.1.4 Receptúra PEK

Receptúra je navrhnutá na základe receptúry REF, referenčné plnivo – kremičitý piesok je doplnené vodivou fázou – petrolejovým koksom. Vodivá fáza predstavuje 10 a 15 % suchej zmesi. Pre dosiahnutie vhodnej konzistencie je pridaná plastifikačná prísada. Tabelárne popisuje variant receptúry s obsahom 10 % vodivej fázy Tabuľka 19 a variant receptúry s obsahom 15 % vodivej fázy Tabuľka 20.

Tabuľka 19 Zloženie receptúry PEK10 s obsahom 10 % vodivej zložky

Receptúra PEK10		
Vstupná zložka	% podiel	Obsah
CEM I 42,5 R	[% hm. suchej zmesi]	25%
Kremičitý piesok CEN	[% hm. suchej zmesi]	65 %
Petrolejový koks	[% hm. suchej zmesi]	10 %
Plastifikačná prísada	[% hm. cementu]	2 %
Vodný súčiniteľ 0,60		

Tabuľka 20 Zloženie receptúry PEK15 s obsahom 15 % vodivej zložky

Receptúra PEK15		
Vstupná zložka	% podiel	Obsah
CEM I 42,5 R	[% hm. suchej zmesi]	25%
Kremičitý piesok CEN	[% hm. suchej zmesi]	60 %
Petrolejový koks	[% hm. suchej zmesi]	15 %
Plastifikačná prísada	[% hm. cementu]	2 %
Vodný súčiniteľ 0,69		

9.2 Zhotovenie skúšobných telies silikátového kompozitu pre vyhrievanie

Z každej receptúry aj jednotlivých variantov boli zhotovené skúšobné telesá pre overenie vlastností hmoty v laboratórnych skúškach. Jednotlivé suroviny boli v stanovených množstvách podľa receptúr postupne zhomogenizované v suchom stave a následne bola pridaná voda s plastifikačnou prísadou na báze lignínsulfonanov. Pri prídavku vody bol kladený dôraz na spracovateľnosť zmesi, ktorá bola horšia pri receptúrach s vodivou zložkou s jemnozrnným grafitom. Vzhľadom na to bola nutná korekcia obsahu vody, čím pochopiteľne došlo aj k zmene vodného súčiniteľa. Snaha zachovať rovnaký vodný súčiniteľ pri všetkých receptúrach tak nebola možná.

Z pripravených zmesí boli odliatím do ocelových trojforiem zhotovené vždy tri skúšobné telesá s rozmermi 40×40×160 mm, do ktorých boli vložené okrúhle elektródy s definovanou vzdialenosťou 120 mm. Na vyrobených telesách budú stanovované najprv vodivostné a potom aj mechanické parametre, aby bola zachytená prípadná zmena štruktúry vplyvom prechodu prúdu a jej dopad na mechanické vlastnosti.

Telesá sa po výrobe nechajú voľne vysychať v laboratórnom prostredí a po 24 hodinách sú odformované. Ukážku vyrobených telies obsahuje Obrázok 43.



Obrázok 43 Skúšobné telesá s elektródami [foto autora]

9.3 Zhrnutie Etapy III

Za účelom výskumu boli navrhnuté štyri receptúry, z toho jedna referenčná, pre možnosť porovnania stanovovaných vlastností. Využité boli suroviny zvolené v predchádzajúcej etape. Návrh spočíval v zachovaní pomeru spojiva a plniva a taktiež celkového percentuálneho podielu vodivej zložky v jednotlivých receptúrach v dvoch variantoch. Pre receptúry s vodivou fázou boli teda navrhnuté vždy dve verzie líšiace sa percentuálnym obsahom vodivej zložky. Z každej receptúry boli zhotovené skúšobné telesá, na ktorých budú po 7 dňoch vykonané laboratórne skúšky.

10 ETAPA IV: EXPERIMENTÁLNE OVERENIE POŽADOVANÝCH VLASTNOSTÍ SILIKÁTOVÉHO KOMPOZITU PRE VYHRIEVANIE

Posledná etapa práce je zameraná na skúšanie zhotovených telies a overenie reálne dosiahnutých parametrov. Skúšky sú realizované po 7 dňoch od výroby telies a výsledky sú porovnávané s požadovanými hodnotami z Etapy I. Záver obsahuje vyhodnotenie dosiahnutých vlastností a s nimi súvisiaci potenciál pre ďalší výskum.

10.1 Stanovenie rezistivity podľa ČSN EN 62561-7

Stanovenie rezistivity telies (impedancie) využíva štvorelektrodovú metódu vychádzajúcu z priloženého napätia na vonkajších elektródach, ktoré zabezpečia prietok elektrického prúdu vzorkou. Na vnútorných elektródach je meraný úbytok napätia pomocou voltmetra a podľa vzťahu (10.1) je vypočítaná výsledná rezistivita.

$$\rho = \frac{R \cdot A}{a} \quad [\Omega \cdot \text{cm}] \quad (10.1)$$

Kde ρ je rezistivita v $\Omega \cdot \text{cm}$, R je rezistancia (odpor) v Ω , A je plocha vodiča kolmá na smer prúdu v cm^2 , a je vzdialenosť medzi vnútornými elektródami, meraná od vnútornej hrany elektródy, v cm. [58] Ukážka z merania je na Obrázku 44.



Obrázok 44 Meranie rezistancie (impedancie) telies [foto autora]

10.2 Metodika stanovenia výhrevnosti telies

Skúška výhrevnosti telies bola realizovaná pomocou samostatnej metodiky z dôvodu neexistencie normového podkladu. Metodika stanovenia je vytvorená s ohľadom na jednoduchosť a opakovateľnosť merania. Na zahrievanie telies je použitý jednosmerný prúd pre bezpečný rozsah napätia a prúdu prístroja (30 V, 3 A) a krátky čas prechodu prúdu vzorkou, vzhľadom na čo nedochádza na elektródach k elektrolýze. Meranie bude realizované na 2 vzorkách z každej receptúry.

Pomôcky:

- Zdroj jednosmerného prúdu s maximálnym možným napätím 30 V a prúdom 3 A
- Termokamera testo 882
- Časomerné zariadenie

Postup:

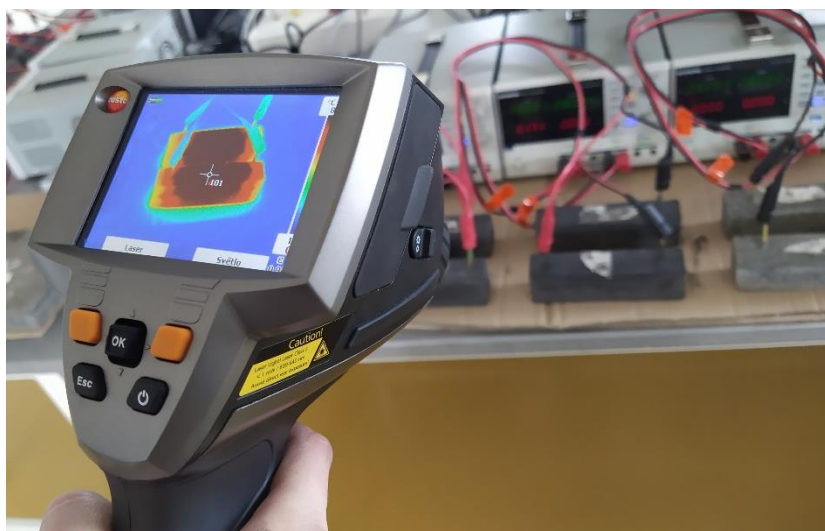
Telesá sa umiestnia na podložku a na ich elektródy sa pripevnia vodiče, cez ktoré bude prechádzať zo zdroja jednosmerný prúd so zvoleným napätím 28 V, ako vidno na Obrázku 45. Zaznamená sa počiatočný čas prechodu prúdu vzorkou a počiatočné hodnoty napätia a prúdu. Pomocou termokamery sa sleduje teplota vzorky, ako je znázornené na Obrázku 46, a v intervale 2 minút sa zaznamenáva termografická snímka telesa. Počas celého merania sa na zdroji sleduje hodnota prúdu a v prípade jej zmeny oproti počiatočnému stavu, vplyvom zmeny impedancie (rezistivity) vzorky, sa nová hodnota prúdu zaeviduje. Meranie sa ukončí, keď sa teplota vzorky nezmení po 15 intervaloch (30 minútach) alebo po dosiahnutí teploty 100 °C. Z veličín prúdu a napätia sa potom vypočíta výkon podľa vzťahu (10.2).

$$P = U \cdot I \quad [W] \quad (10.2)$$

Kde P je výkon jednosmerného prúdu vo W, U je hodnota napätia vo V a I hodnota prúdu v A. [1]



Obrázok 45 Pripojenie vzoriek na zdroj jednosmerného prúdu pre meranie výhrevnosti [foto autora]



Obrázok 46 Meranie teploty vzoriek termokamerou [foto autora]

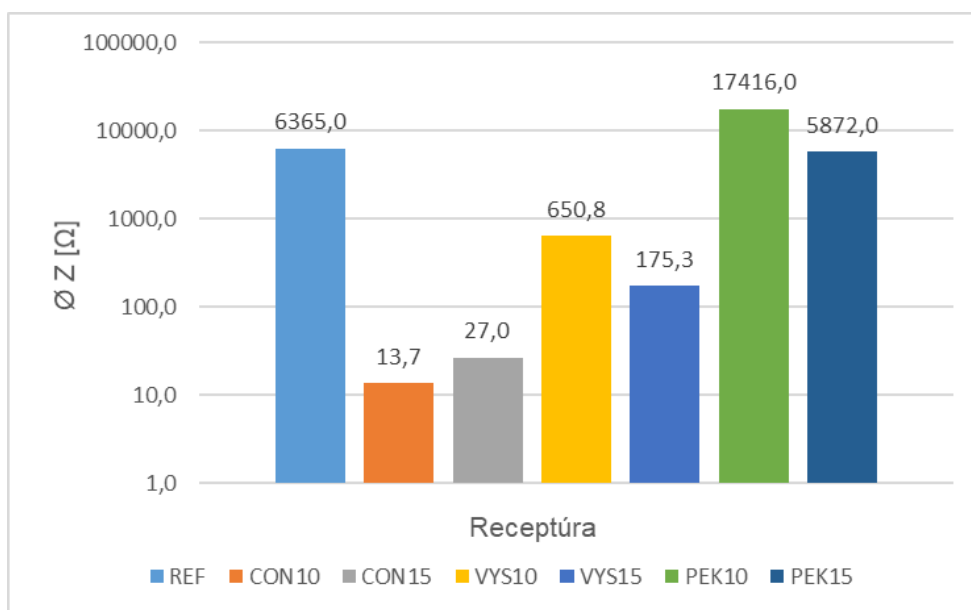
10.3 Namerané a vypočítané hodnoty

Tabuľka 21 Namerané hodnoty impedancie prepočítané na rezistivitu po 7 dňoch

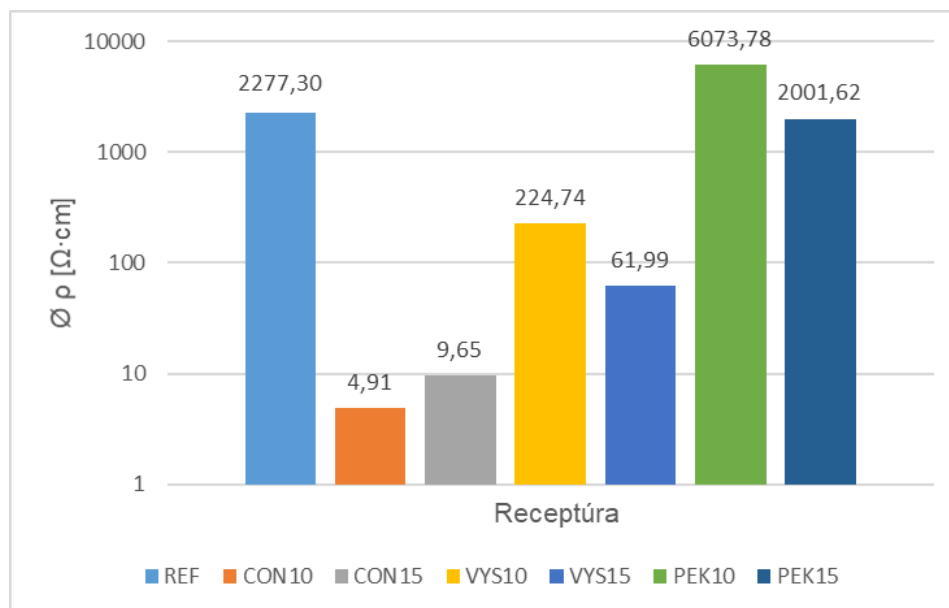
Teleso	Z [Ω]	\emptyset Z [Ω]	φ [rad]	R [Ω]	A [cm^2]	a [cm]	ρ [$\Omega \cdot \text{cm}$]	$\emptyset \rho$ [$\Omega \cdot \text{cm}$]
REF 1	6984,0	6365,0	-0,0157	6983,14	4,29	12,00	2498,74	2277,30
REF 2	5616,0		-0,0122	5615,58			2009,39	
REF 3	6495,0		-0,0157	6494,20			2323,78	
CON10 1	14,5	13,7	-0,0052	14,50			5,19	4,91
CON10 2	14,2		-0,0052	14,20			5,08	
CON10 3	12,5		-0,0035	12,50			4,47	
CON15 1	27,3	27,0	-0,0087	27,30			9,77	9,65
CON15 2	30,9		-0,0166	30,92			11,06	
CON15 3	22,7		-0,0108	22,67			8,11	
VYS10 1	676,0	650,8	-0,2793	649,81			232,52	224,74
VYS10 2	701,1		-0,2793	673,98			241,17	
VYS10 3	575,2		-0,2269	560,44			200,54	
VYS15 1	180,1	175,3	-0,1484	178,12			63,74	61,99
VYS15 2	159,2		-0,1449	157,53			56,37	
VYS15 3	186,7		-0,1693	184,03			65,85	
PEK10 1	25253,0	17416,0	-0,2269	24605,77			8804,54	6073,78
PEK10 2	16350,0		-0,2147	15974,70			5716,13	
PEK10 3	10645,0		-0,2391	10342,14			3700,67	
PEK15 1	6602,0	5872,0	-0,3142	6278,88			2246,73	2001,62
PEK15 2	5294,0		-0,2967	5062,68			1811,55	
PEK15 3	5720,0		-0,3142	5440,04			1946,58	

Tabuľka 22 Namerané hodnoty napätia a prúdu prepočítané na výkon v počiatočnom stave a po prípadnej zmene v čase 20 min

Teleso	U [V]	I ₀ [A]	I _{20 min} [A]	P ₀ [W]	Ø P ₀ [W]	P _{20 min} [W]	Ø P _{20 min} [W]
REF 1	28,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
REF 2		0,00	0,00	0,00		0,00	
CON10 1		2,17	2,17	60,62	61,57	2,17	61,57
CON10 2		2,23	2,23	62,52		2,23	
CON15 1		1,06	1,12	29,57	30,24	31,39	32,42
CON15 2		1,10	1,20	30,91		33,46	
VYS10 1		0,02	0,02	0,56	0,56	0,02	0,56
VYS10 2		0,02	0,02	0,56		0,02	
VYS15 1		0,15	0,16	4,20	3,91	4,37	4,09
VYS15 2		0,13	0,14	3,61		3,81	
PEK10 1		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PEK10 2		0,00	0,00	0,00		0,00	
PEK15 1		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PEK15 2		0,00	0,00	0,00		0,00	



Graf 6 Grafické znázornenie priemernej nameranej impedancie vzoriek po 7 dňoch



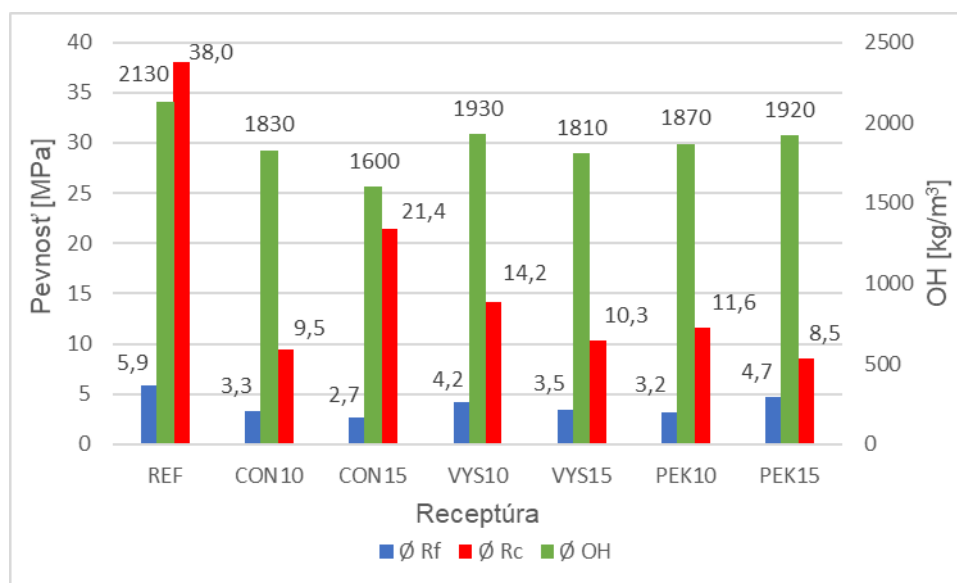
Graf 7 Grafické znázornenie priemernej vypočítanej rezistivity vzoriek po 7 dňoch

Tabuľka 23 Vypočítané hodnoty pevnosti v ťahu za ohybu a pevnosti v tlaku po 7 dňoch

Teleso	l [mm]	b [mm]	h [mm]	F _f [N]	R _f [MPa]	Ø R _f [MPa]	F _c [N]	R _c [MPa]	Ø R _c [MPa]
REF 1	100,0	39,9	40,0	2350	5,5	5,9	61750	38,6	38,0
REF 2		39,9	40,0	2750	6,5		64750	40,5	
REF 3		39,8	40,0	2450	5,8		56000	35,0	
CON10 1		40,0	39,8	1600	3,8	3,3	14550	9,1	9,5
CON10 2		39,9	39,5	1500	3,6		16350	10,2	
CON10 3		39,7	39,7	1050	2,5		14650	9,2	
CON15 1		40,0	38,6	1100	2,8	2,7	34200	21,4	21,4
CON15 2		40,0	38,9	1150	2,8		34250	21,4	
CON15 3		39,5	39,3	1000	2,5		34500	21,6	
VYS10 1		39,8	40,0	1850	4,4	4,2	23100	14,4	14,2
VYS10 2		39,9	40,0	1650	3,9		23000	14,4	
VYS10 3		39,9	40,6	1850	4,2		22100	13,8	
VYS15 1		39,8	39,7	1350	3,2	3,5	17200	10,8	10,3
VYS15 2		39,5	39,8	1500	3,6		16450	10,3	
VYS15 3		39,8	40,0	1550	3,7		15950	10,0	
PEK10 1		39,9	40,0	1250	2,9	3,2	17200	10,8	11,6
PEK10 2		39,8	40,3	1500	3,5		20150	12,6	
PEK10 3		39,8	39,8	1300	3,1		18100	11,3	
PEK15 1		39,9	39,6	2000	4,8	4,7	12800	8,0	8,5
PEK15 2		39,9	39,6	1850	4,4		12950	8,1	
PEK15 3		39,8	39,3	2050	5,0		14850	9,3	

Tabuľka 24 Vypočítané hodnoty objemovej hmotnosti po 7 dňoch

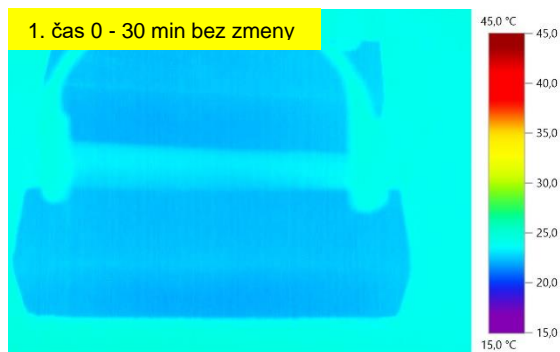
Teleso	m [g]	l [mm]	b [mm]	h [mm]	OH [kg/m ³]	Ø OH [kg/m ³]
REF 1	534,23	159,8	39,9	40,0	2090	2130
REF 2	547,48	158,8	39,9	40,0	2160	
REF 3	542,33	158,8	39,8	40,0	2150	
CON10 1	456,31	158,5	40,0	39,8	1810	1830
CON10 2	447,12	157,0	39,9	39,5	1810	
CON10 3	464,25	157,8	39,7	39,7	1870	
CON15 1	380,39	156,0	40,0	38,6	1580	1600
CON15 2	384,35	156,5	40,0	38,9	1580	
CON15 3	398,30	155,6	39,5	39,3	1650	
VYS10 1	490,68	158,5	39,8	40,0	1940	1930
VYS10 2	487,52	158,6	39,9	40,0	1930	
VYS10 3	494,35	158,5	39,9	40,6	1930	
VYS15 1	455,83	158,5	39,8	39,7	1820	1810
VYS15 2	453,37	158,0	39,5	39,8	1830	
VYS15 3	448,68	158,0	39,8	40,0	1780	
PEK10 1	472,53	159,4	39,9	40,0	1860	1870
PEK10 2	478,23	159,6	39,8	40,3	1870	
PEK10 3	475,73	160,0	39,8	39,8	1880	
PEK15 1	481,50	159,6	39,9	39,6	1910	1920
PEK15 2	482,47	159,0	39,9	39,6	1920	
PEK15 3	479,35	159,0	39,8	39,3	1930	



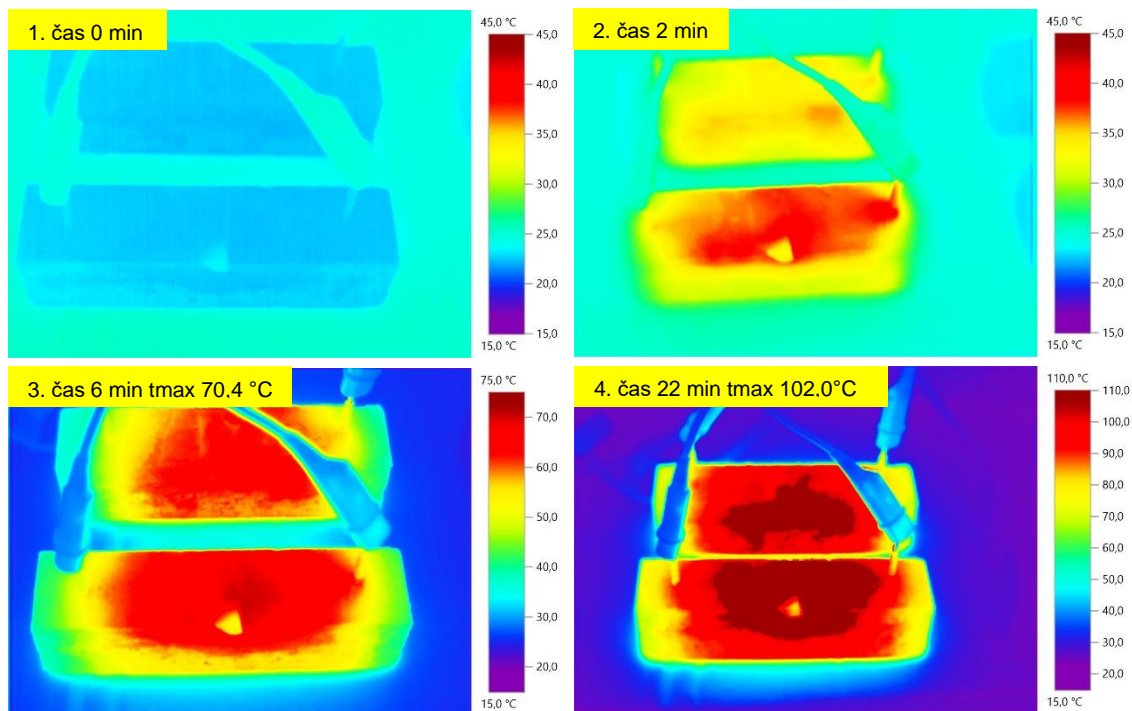
Graf 8 Grafické znázornenie priemerných vypočítaných hodnôt pevností a objemovej hmotnosti vzoriek po 7 dňoch

10.4 Záznamy z merania výhrevnosti

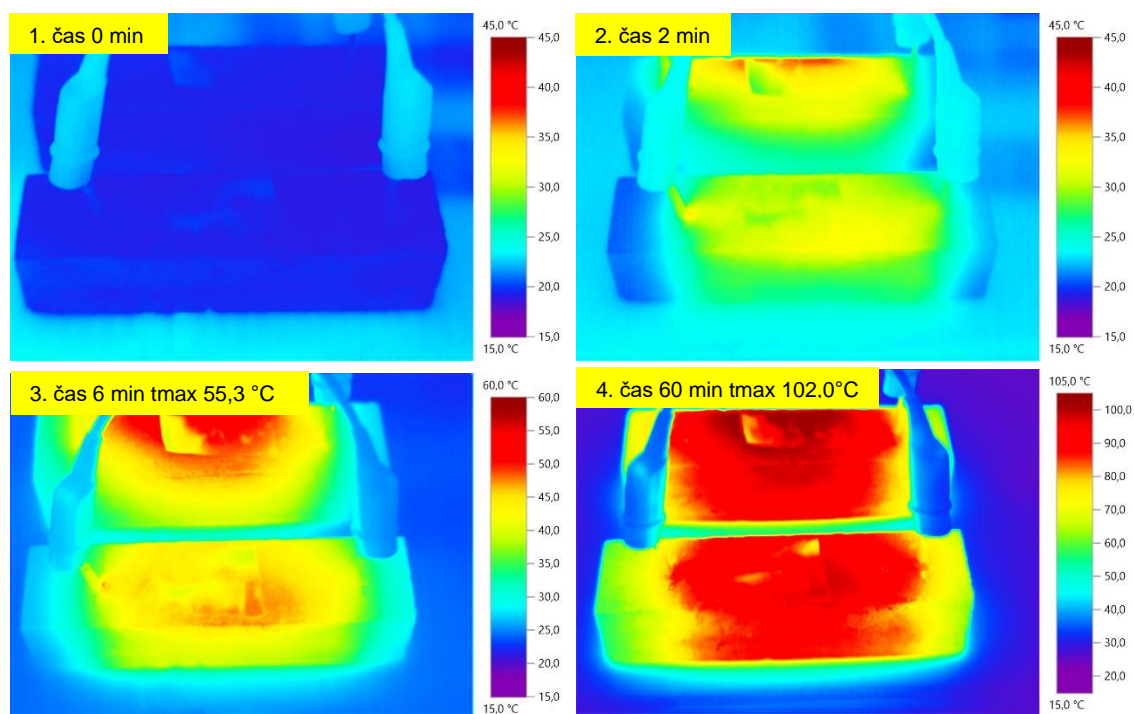
Pri meraní výhrevnosti vonkajšie prostredie zodpovedalo laboratórnemu prostrediu s teplotou 23 °C a relatívnou vlhkosťou 55 %. Telesá boli skúšané po 7 dňoch od výroby a ich počiatočná teplota zodpovedala laboratórnej teplote 23 °C. Záznamy z merania pre jednotlivé receptúry sú na nasledujúcich obrázkoch (Obrázok 47 až Obrázok 53). Pri receptúrach REF, VYS10, PEK10 a PEK15 nárast teploty v požadovanom čase 30 minút nenastal, preto záznam z merania termokamerou obsahuje len jednu snímku.



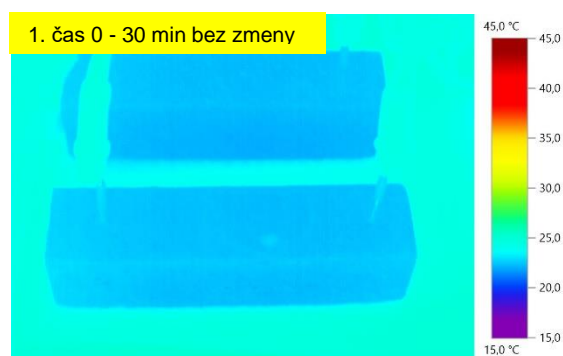
Obrázok 47 Záznam z termokamery pre receptúru REF [foto autora]



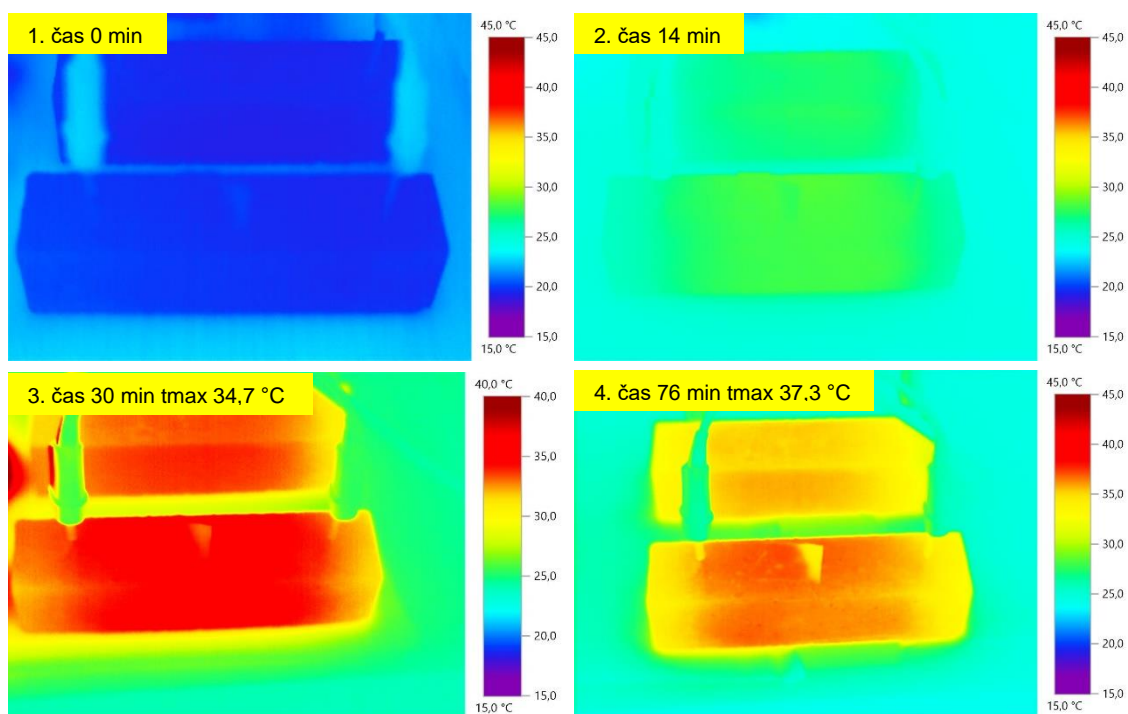
Obrázok 48 Záznam z termokamery pre receptúru CON10 [foto autora]



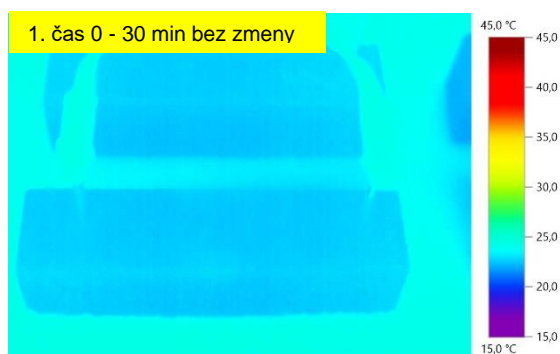
Obrázok 49 Záznam z termokamery pre receptúru CON15 [foto autora]



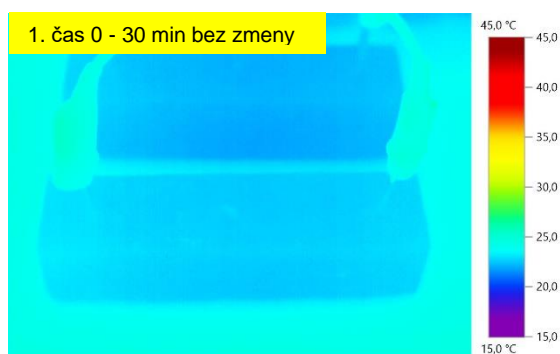
Obrázok 50 Záznam z termokamery pre receptúru VYS10 [foto autora]



Obrázok 51 Záznam z termokamery pre receptúru VYS15 [foto autora]



Obrázok 52 Záznam z termokamery pre receptúru PEK10 [foto autora]



Obrázok 53 Záznam z termokamery pre receptúru PEK15 [foto autora]

10.5 Vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov

Záverečná etapa bola zameraná na experimentálne overenie vlastností vyrobených telies podľa receptúr z Etapy III. Telesá boli podrobené skúškam po 7 dňoch od výroby, pričom najskôr prebehli skúšky elektricko-vodivostných a výhrevných vlastností a následne skúšky mechanických vlastností. Poradie skúšok malo postihnúť prípadný pokles mechanických vlastností po zahrievaní kompozitu. Z tohto dôvodu boli vyhrievaniu vystavené len 2 telesá z celkových 3 vyrobených pre každú receptúru, pričom mechanické vlastnosti boli stanovené na všetkých 3 vyrobených telesách.

Prvou skúšanou vlastnosťou bola impedancia (rezistivita) kompozitu, meraná na základe ČSN EN 62561-7. Z nameraných hodnôt impedancie Z bola vypočítaná hodnota rezistancie R a z nej následne hodnota rezistivity ρ . Podľa požiadavky formulovanej v Etape I na hodnotu impedancie Z rovnej $100\ \Omega$ a údajov z Tabuľky 21 je zrejmé, že vyhovela receptúra CON10 a CON15, ktorá využívala náhradu grafitovým prachom Condufit C4. S priemernými hodnotami impedancie $13,7\ \Omega$ (CON10) a $27,0\ \Omega$ (CON15) sa potvrdil predpoklad o výhode použitia tohto grafitového prachu, napriek faktu, že v porovnaní s odpadným grafitovým prachom „vysávač“ mal takmer štvornásobnú vlastnú impedanciu. Je zjavné, že receptúra s 10 % vodivého plniva vykazovala o niečo lepšie vodivostné vlastnosti, čo môže byť spôsobené lepším rozptýlením menšieho množstva vodivého plniva v kompozite, v dôsledku prílišnej jemnosti grafitového prachu. Receptúra s odpadným grafitom „vysávač“ vykazovala druhú najnižšiu hodnotu impedancie, pričom VYS15 s vyšším obsahom odpadného grafitu (15 %), požadovanú hodnotu impedancie prevýšila o približne $75\ \Omega$. Dôležitosť funkcie vodivého plniva zabezpečujúceho elektrickú vodivosť bola zjavná pri receptúre s petrolejovým koksom PEK, kde pri 10 % obsahu vodivého plniva došlo k viac ako dvojnásobnému navýšeniu impedancie oproti referenčnej vzorke bez vodivej zložky. Petrolejový koks sa teda v sledovaných množstvách ukázal ako nevyhovujúci pre dané účely. Na hodnoty impedancie a následne aj rezistivity mala bezpochyby vplyv aj vlhkosť, ktorá bola po 7 dňoch od výroby telies stále prítomná. Potvrdzuje to priemerná rezistivita referenčnej receptúry REF, ktorá dosahovala oproti hodnotám z literatúry po 28 dňoch o 2 rády nižšiu rezistivitu.

Po zistení impedancie boli telesá podrobené skúške výhrevnosti. Ako najrýchlejšia z hľadiska požiadaviek na rýchlosť vývoja teploty telesa a funkčná z hľadiska výšky dosiahnutej teploty sa javila receptúra CON10 s obsahom 10 % plniva, pri ktorej bola maximálna teplota $100\ ^\circ\text{C}$ dosiahnutá v priebehu 22 minút. Pri receptúre s rovnakým

druhom vodivého plniva a vyššou percentuálnym obsahom (15 %) bola rovnako dosiahnutá teplota 100 °C, avšak za takmer trojnásobnú dobu – 60 minút. Receptúra využívajúca 15 % odpadného grafitu „vysávač“ VYS15 dosiahla požadovaný nárast teploty a v priebehu 76 minút sa hodnota ustálila na úrovni približne 37 °C, ktorá je v súlade s kritériami a nespôsobí popálenie pri kontakte s ľudským telom. Pri ostatných receptúrach nedošlo k ohriatiu telies nad teplotu prostredia. Hodnoty vypočítaného výkonu jednotlivých receptúr zodpovedali schopnosti ich výhrevnosti. Pri receptúrach CON15 a VYS15 došlo v priebehu vyhrievania k poklesu rezistivity vzorky a tým k nárastu výkonu. Pokles rezistivity pravdepodobne nastal vplyvom odparu vlhkosti. Tento jav bol zaznamenaný rovnako v diplomovej práci venovanej vývoju elektricky vodivých kompozitov na báze druhotných surovín, kde pri použití rovnakého typu grafitového plniva klesla impedancia oproti nasýtenému stavu takmer na polovicu [52]. Dá sa teda predpokladať, že v prípade funkčných vodivých grafitových plnív vlhkosť negatívne ovplyvňuje ich vodivosť. Tento predpoklad bude overený v budúcom výskume riešenej problematiky.

Mechanické vlastnosti vzoriek boli posudzované najskôr z hľadiska pevnosti v ťahu za ohybu a následne pevnosti v tlaku. Podľa požiadaviek formulovaných v Etape I splnila ohybovú pevnosť nad 4 MPa okrem referenčnej receptúry ešte receptúra VYS10 a PEK15. Ani jedna z receptúr však nevyhovovala z hľadiska výhrevnosti, preto nie je výsledok ich priaznivých vlastností v ťahu za ohybu prínosný. Z receptúr, pri ktorých bola zaznamenaná schopnosť výhrevnosti, bola najbližšie požadovanej hodnote receptúra VYS15 s dosiahnutou pevnosťou v ťahu za ohybu 3,5 MPa. Požiadavka na pevnosť v tlaku 15 MPa bola splnená pri referenčnej receptúre a tiež receptúre CON 15, ktorá vykazovala sľubný potenciál z hľadiska výhrevnosti. Ostatné receptúry s priaznivou výhrevnosťou dosahovali pevnosti v tlaku približne 10 MPa. Zahrievaním telies počas skúšky výhrevnosti nedošlo k významnému ovplyvneniu mechanických vlastností, ako je badateľné z hodnôt pevností v Tabuľke 23 a Tabuľke 24, kde boli skúške výhrevnosti vystavené vždy vzorky s poradovým číslom 1 a 2.

Na základe dosiahnutých výsledkov sa dá konštatovať, že receptúry CON10, CON15 splnili požiadavky na elektrickú vodivosť. Receptúry CON10, CON15 a VYS15 splnili požiadavky na výhrevnosť. Mechanické parametre ani jednej z funkčných receptúr však nedosahujú v 7 dňoch veku telies obe požadované hodnoty. Získané skutočnosti ale aj napriek nesplneniu všetkých požiadaviek môžu výrazne pomôcť pri ďalšom vývoji a optimalizácii parametrov v rámci tejto tematiky.

ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo navrhnuť elektricky vodivý silikátový kompozit schopný vyhrievania, ktorý by mal nájsť uplatnenie v oblasti údržby vonkajších a úžitkových plôch počas zimného obdobia. Zníženie impedancie a tým zabezpečenie elektrickej vodivosti malo byť docielené vhodnými elektricky vodivými plnivami, v najlepšom prípade druhotného charakteru, pre nasledovanie vízie udržateľnej podoby stavebníctva.

Za účelom nazbierania informácií a pochopenia súvislostí, ktoré boli aplikované do vývoja vyhrievaného kompozitu bola teoretická časť práce rozdelená do štyroch kapitol. Oblasťou fungovania elektrického poľa a princípmi vedenia elektrického prúdu sa zaoberala prvá kapitola teoretickej časti. Druhá kapitola zhrnula základné informácie zo silikátov a silikátových spojív, tretia kapitola obsahovala poznatky z kompozitov a druhov hlavne primárnych vodivých fáz. Záverečná kapitola teoretickej časti hodnotila súčasnú úroveň poznania a výskumu vyhrievaných kompozitov.

Praktická časť pozostávala rovnako zo štyroch etáp, ktoré tvorili navzájom prepojený súbor informácií. Prvá etapa sa zaoberala formulovaním parametrov prostredia, ktorému by mohol byť kompozit v praxi vystavený a s ním súvisiacimi požiadavkami na navrhovanú hmotu. Druhá etapa poskytovala prehľad surovín a analýzu ich dôležitých parametrov, ktoré vstupovali do výberu optimálnych materiálových zložiek pre návrh vyhrievaného kompozitu. V závere etapy bola zvolená vhodná surovinová základňa. V tretej etape boli zo zvolených surovín navrhnuté konkrétne receptúry a vyrobené skúšobné telesá.

Pri výrobe telies nebolo možné zachovať zhodný vodný súčiniteľ, a to pre rôznorodosť merných povrchov jednotlivých vodivých zložiek. Tento fakt sa však nakoniec nepodpísal na schopnosti výhrevnosti telies. Vyrobené telesá boli podrobené skúškam po 7 dňoch voľného vysychania v laboratórnom prostredí.

Overenie hodnôt impedancie kompozitu vyrobeného podľa jednotlivých receptúr potvrdilo prítomnosť zbytkovej vlhkosti. Napriek tomu, zbytková vlhkosť nepodporila splnenie kritéria $100\ \Omega$ pri receptúrach s fungujúcim vodivým plnivom. Najvýraznejšie ovplyvnená bola rezistivita (vypočítaná z impedancie) referenčnej receptúry na úrovni $6,37 \cdot 10^3\ \Omega \cdot \text{cm}$, kde bola dosiahnutá o dva rády nižšia hodnota v porovnaní s bežne uvádzanou rezistivitou $6,54 \cdot 10^5$ až $11,4 \cdot 10^5\ \Omega \cdot \text{cm}$. Jedinou receptúrou, ktorá s vysokou rezervou splnila požiadavky na limit impedancie $100\ \Omega$ bola receptúra s obsahom primárneho grafitového prachu Condufit C4. Výška impedancie receptúr bola

pre 10 % vodivej zložky CON10 13,7 Ω a 15 % vodivej zložky CON15 27,0 Ω . Receptúra s obsahom petrolejového koksu sa ukázala ako nevyhovujúca, a to najmä pri obsahu 10 % vodivej zložky PEK10, pretože s rezistivitou $6,1 \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ dosahovala vyššie hodnoty ako receptúra referenčná. Vo variante s obsahom 15 % vodivej zložky PEK15 rezistivita klesla mierne pod úroveň referenčnej receptúry.

Požiadavky na výhrevnosť s vývojom teploty kompozitu aspoň 10 °C nad teplotu exteriéru za dobu 30 min, maximálnou teplotou 100 °C – ideálne do 50 °C splnila okrem receptúry s obsahom primárneho grafitu Condufit C4 ešte receptúra s obsahom odpadného grafitu „vysávač“. Pri receptúrach s prídavkom grafitového prachu Condufit C4 v obsahu 10 a 15 % (CON10 a CON15) bolo zvýšenie teploty aspoň o 10 °C nad teplotu exteriéru dosiahnuté v priebehu jednotiek minút, pričom teploty nad 100 °C boli dosiahnuté za 20 a 60 minút. Odpadný grafit „vysávač“ splnil požiadavky v modifikácii receptúry VYS15 s vyšším percentuálnym obsahom vodivej zložky (15 %). Konkrétne s teplotou 34,7°C za 30 minút a maximálnou dosiahnutou teplotou 37,3 °C za dobu 76 minút. Tento výsledok je značným úspechom práce, pretože sa podarilo docieľiť využitie druhotnej suroviny pre účely výhrevnosti.

Z hľadiska mechanických parametrov sa nepodarilo dosiahnuť obe požadované charakteristiky 7 denných pevností – v ťahu za ohybu 4 MPa a v tlaku 15 MPa súčasne pri žiadnej z navrhnutých receptúr. Z receptúr, ktoré vyhovovali z hľadiska výhrevnosti dosiahla najlepšie parametre v tlaku 21,4 MPa receptúra CON15 pri najnižšej hodnote objemovej hmotnosti 1600 kg/m³. Receptúry CON10 a VYS15 dosahovali pevnosti okolo 10 MPa pri približnej objemovej hmotnosti 1800 kg/m³. Z hľadiska pevnosti v ťahu za ohybu dosiahla z fungujúcich receptúr najlepšie výsledky VYS15 s 3,5 MPa. Receptúry CON10 a CON15 sa v ťahu za ohybu dostali na úroveň približne 3 MPa. Dá sa však konštatovať, že hodnoty pevností boli na úrovni 7 dní veľmi sľubné, a s najväčšou pravdepodobnosťou by boli požadované mechanické vlastnosti dosiahnuté po 28 dňoch.

Z uvedených skutočností je zrejmé, že najdôležitejší cieľ práce v podobe návrhu elektricky vodivého silikátového kompozitu pre vyhrievanie s dôrazom na druhotné suroviny bol splnený. Čiastočný cieľ v podobe dosiahnutých hodnôt impedancie, a predpokladané mechanické vlastnosti boli splnené pri niektorých receptúrach, nie však všetky súčasne. Tieto zistenia ponúkajú priestor pre ďalší výskum a optimalizáciu surovinového zloženia pre dosiahnutie ideálnej kombinácie z hľadiska výhrevnosti, impedancie aj mechanických parametrov.

BIBLIOGRAFIA

1. ČIČMANEC, P. *Všeobecná fyzika 2: Elektrina a magnetizmus*. Bratislava: ALFA, 1980. ISBN 63-560-80.
2. HORÁK, Z., F. KRUPKA a V. ŠINDELÁŘ. *Technická fyzika*. 3. vyd. Praha: STNL, 1961.
3. KLIMEŠ, B., J. KRACÍK a A. ŽENÍŠEK. *Základy fyziky II*. Praha: Academica, 1972. ISBN 104-21-825.
4. JAVORSKI, B. M. a JU. A. SELEZNĚV. *Přehled elementární fyziky*. Praha: STNL, 1989. ISBN 04-018-89.
5. BINKO, J., I. KAŠPAR a kol. *Fyzika stavebního inženýra*. Praha: STNL, 1983. ISBN 04-022-83.
6. GAŽO, J. a kol. *Všeobecná a anorganická chémia*. 3. vyd. Bratislava: ALFA, 1981. ISBN 63-557-81.
7. BRODŇAN, M. a K. ŠLOPKOVÁ. *Stavebná chémia*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2018. ISBN 978-80-554-1423-2.
8. FRAŇO, V., M. ĎURKOVIČ, J. KRÁL, J. NOVÁK, J. NOVOTNÝ a F. PŘIBYL. *Stavebné látky*. Bratislava: ALFA, 1987. ISBN 063-578-87.
9. HLAVÁČ, J. *Základy technologie silikátů*. 2. vyd. Praha: STNL, 1988. ISBN 04-816-88.
10. ČSN EN 197-1 ED. 2. *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. 2. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2012. Třídící znak 722101.
11. REMY, H. *Anorganická chemie I. díl*. 2. vyd. Praha: STNL, 1972. ISBN 04-603-72.
12. AGARWAL, B. D. a L. J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity*. Praha: STNL, 1987. ISBN 04-216-87.
13. DAĐOUREK, K. *Kompozitní materiály definice a rozdělení* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008. [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf
14. WU, J., J. LIU a F. YANG. Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, vol. 75, p. 129-135 [cit. 2020-12-02]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.11.004
15. JERGA, R. *Příprava elektrod ze svazků uhlíkových vláken a jejich analytické využití* [online]. Olomouc, 2018 [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/iet40p/>. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta.
16. CHUNG, D. D. L. *Carbon Fiber Composites* [online]. Butterworth-Heinemann, 1994 [cit. 2020-11-28]. ISBN 978-0-08-050073-7. Dostupné z: <https://books.google.sk/books?id=UYQXAAAQBAJ>
17. BHATT, P. a A. GOE. Carbon Fibres: Production, Properties and Potential Use. *Material Science Research India* [online]. 2017, vol. 14, no. 1, p. 52-57 [cit. 2021-03-07]. ISSN 09733469. Dostupné z: doi:10.13005/msri/140109
18. ZOLTEK Corporation [online]. Bridgeton: ZOLTEK, 2021 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://zoltek.com/>

19. BAOGUO, H., Y. XUN a O. JINPING. *Self-Sensing Concrete in Smart Structures* [online]. Butterworth-Heinemann, 2014 [cit. 2020-11-28]. ISBN 978-0-12-800517-0. Dostupné z: <https://books.google.sk/books?id=PmhzAwAAQBAJ>
20. YAZDANI, N. and E. BROWN. Carbon nanofibers in cement composites: Mechanical reinforcement. In: LOH, Kenneth J. and Satish NAGARAJIAH, eds. *Innovative Developments of Advanced Multifunctional Nanocomposites in Civil and Structural Engineering* [online]. Woodhead Publishing, 2016, p. 47-58 [cit. 2020-11-30]. ISBN 978-1-78242-326-3. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/carbon-nanofibres>
21. SHANG, S.M. and W. ZENG. Conductive nanofibres and nanocoatings for smart textiles. In: KIRSTEIN, Tünde, ed. *Multidisciplinary Know-How for Smart-Textiles Developers* [online]. Woodhead Publishing, 2013, p. 92-128 [cit. 2020-11-30]. ISBN 978-0-85709-342-4. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/carbon-nanofibres>
22. *Applied Sciences, Inc.* [online]. Cedarville: Applied Sciences, 2012 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <http://apsci.com/>
23. MALLAKPOUR, S. and S. RASHIDIMOGHADAM. Carbon Nanotubes for Dyes Removal. In: KYZAS, George Z. and Athanasios C. MITROPOULOS, eds. *Composite Nanoadsorbents* [online]. Elsevier, 2019, p. 211-243 [cit. 2020-11-29]. ISBN 978-0-12-814132-8. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/carbon-nanotubes>
24. *US Research Nanomaterials, Inc* [online]. Houston: US Research Nanomaterials [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.us-nano.com/>
25. *ArcelorMittal* [online]. ArcelorMittal, 2021 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://corporate.arcelormittal.com/>
26. DONNET, J. B., R. Ch. BANSAL and M. J. WANG. Introduction. In: DONNET, Jean-Baptiste, Roop Chand BANSAL and Meng-Jiao WANG, eds. *Carbon Black: Science and Technology* [online]. 2nd. USA: CRC Press, 1993 [cit. 2020-11-30]. ISBN 9781351462617. Dostupné z: <https://books.google.sk/books?id=SPpx6MkRYwMC>.
27. *Imerys* [online]. Bironico: Imerys, 2020 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.imerys-graphite-and-carbon.com/>
28. *TRUNNANO* [online]. [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.nanotrunk.com/>
29. SHISHEGARAN, A., F. DANESHPAJOH, H. TAGHAVIZADE a S. MIRVALAD. Developing conductive concrete containing wire rope and steel powder wastes for route deicing. *Construction and Building Materials* [online]. 2020, vol. 232 [cit. 2020-11-29]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117184
30. MAKUL, N. Advanced smart concrete - A review of current progress, benefits and challenges. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2020, vol. 274 [cit. 2020-11-29]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2020.122899
31. LI, H., Q. ZHANG a H. XIAO. Self-deicing road system with a CNFP high-efficiency thermal source and MWCNT/cement-based high-thermal conductive composites. *Cold Regions Science and Technology* [online]. 2013, vol. 86, p. 22-35 [cit. 2020-12-02]. ISSN 0165232X. Dostupné z: doi:10.1016/j.coldregions.2012.10.007
32. SASSANI, A., H. CEYLAN, S. KIM, A. ARABZADEH, P. C. TAYLOR a K. GOPALAKRISHNAN. Development of Carbon Fiber-modified Electrically Conductive Concrete for Implementation in Des Moines International Airport. *Case Studies in*

- Construction Materials* [online]. 2018, vol. 8, p. 277-291 [cit. 2020-12-02]. ISSN 22145095. Dostupné z: doi:10.1016/j.cscm.2018.02.003
33. RAO, R., J. FU, Y. CHAN, Ch. Y. TUAN a Ch. LIU. Steel fiber confined graphite concrete for pavement deicing. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2018, vol. 155, p. 187-196 [cit. 2020-12-02]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2018.08.013
34. SLÁVIK, R. *Hygrotermálna odozva stavebných konštrukcií* [online]. Brno, 2018 [cit. 2021-02-03]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=186916. Dizertačná práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
35. COUSSY, O., P. DANGLA, T. LASSABATÈRE a V. BAROGHEL-BOUNY. The equivalent pore pressure and the swelling and shrinkage of cement-based materials. *Materials and Structures* [online]. 2004, vol. 37, no. 4, p. 15-20 [cit. 2021-02-04]. ISSN 1359-5997. Dostupné z: doi:10.1007/BF02481623
36. AN, M., H. HUANG, Y. WANG a G. ZHAO. Effect of thermal cycling on the properties of high-performance concrete: Microstructure and mechanism. *Construction and Building Materials* [online]. 2020, vol. 243 [cit. 2021-02-05]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118310
37. GARBALIŇSKA, H. a A. WYGOCKA. Microstructure modification of cement mortars: Effect on capillarity and frost-resistance. *Construction and Building Materials* [online]. 2014, vol. 51, p. 258-266 [cit. 2021-02-05]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.10.091
38. LONG, W., J. WEI, F. XING a K. H. KHAYAT. Enhanced dynamic mechanical properties of cement paste modified with graphene oxide nanosheets and its reinforcing mechanism. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2018, vol. 93, p. 127-139 [cit. 2021-02-05]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2018.07.001
39. DIN EN 16192:2012-02. *Charakterisierung von Abfällen - Analyse von Eluaten; Deutsche Fassung EN 16192:2011*. Berlin: Deutsches institut für normung e.v., 2012.
40. ČSN EN 12457-2. *Charakterizace odpadů - Vyluhování - Ověřovací zkouška vyluhovatelnosti zrnitých odpadů a kalů - Část 2: Jednostupňová vsádková zkouška při poměru kapalné a pevné fáze 10 l/kg pro materiály se zrnitostí menší než 4 mm (bez zmenšení velikosti částic, nebo s ním)*. Praha: Český normalizační institut, 2003. Třídící znak: 838005.
41. ČSN EN 196-1. *Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2016. Třídící znak 722100.
42. BARR, B, S.B HOSEINIAN a M.A BEYGI. Shrinkage of concrete stored in natural environments. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2003, vol. 25, no. 1, p. 19-29 [cit. 2021-02-04]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/S0958-9465(01)00044-0
43. KRATOCHVÍL, M., I. TERZIJSKI, J. KADLEC a L. ZVOLÁNEK. Autogenní smršťování a jeho měření od okamžiku uložení betonu. *BETON TKS: Sanace, rekonstrukce a diagnostika* [online]. Praha: BETON TKS, S. R. O, 2014, roč.14, č. 3/2014, s. 64-67 [cit. 2021-5-14]. ISSN 12133116. Dostupné z: https://www.betonTKS.cz/sites/default/files/BETON_3-14.pdf
44. BISSONNETTE, B. P. PIERRE a M. PIGEON. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. *Cement and Concrete Research* [online].

- 1999, vol. 29, no.10, p. 1655-1662 [cit. 2021-02-07]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/S0008-8846(99)00156-8
45. VIDELA, C. a C. AGUILAR. An updated look at drying shrinkage of Portland and blended Portland cement concretes. *Magazine of Concrete Research* [online]. 2006, vol. 58, no.7, p. 459-476 [cit. 2021-02-17]. ISSN 0024-9831. Dostupné z: doi:10.1680/macr.2006.58.7.459
46. ČSN 73 1320. *Stanovení objemových změn betonu*. Praha: Český normalizační institut, 1988. Třídící znak 731320.
47. ČSN EN 1504-3. *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody - Část 3: Opravy se statickou funkcí a bez statické funkce*. Praha: Český normalizační institut, 2006. Třídící znak 732101.
48. MCCARTER, W.J, G STARRS a T.M CHRISP. Electrical conductivity, diffusion, and permeability of Portland cement-based mortars. *Cement and Concrete Research* [online]. 2000, vol. 30, no. 9, p. 1395-1400 [cit. 2021-03-04]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/S0008-8846(00)00281-7
49. *Heidelbergcement* [online]. Heidelbergcement, 2020 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/baleny-cement/cemi425r>
50. JIRÁSEK, T. *Popílek z energetiky* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/98303/JIR0021_HGF_B2102_3904R022_2013.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Hornicko-geologická fakulta.
51. ŠPAK, M., I. HALAŠA, M. ŠUSTER a O. VOJTECHOVSKÝ. *Informácie o používaní popolčeka do betónu* [online]. Trnava: BetónRacio, 2012 [cit. 2021-03-05]. ISBN 978-80-969182-6-3. Dostupné z: http://betonratio.sk/wp-content/uploads/ediciaBR/popolcek_info_2012.pdf
52. BARÁNEK, Š. *Elektricky vodivé kompozity na bázi druhotných surovin* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=220529. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
53. SUROVKA, D. *Možnosti energetického využití produktů pyrolýzního zpracování odpadů* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/86256/SUR090_HGF_N2102_3904T022_2011.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Hornicko-geologická fakulta.
54. KUNECOVÁ, D. *Pyrolýza biomasy a triedeného komunálneho odpadu ako zdroj energie, chemikálií a uhlíkového zvyšku spojená so znižovaním skleníkových plynov* [online]. Bratislava, 2012 [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: https://fmph.uniba.sk/fileadmin/fmfi/studium/autoreferaty/AR_Kunecova.pdf. Autoreferát dizertačnej práce. Univerzita Komenského v Bratislave, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky.
55. LIGOCKÝ, R. *Návrh nákupní strategie společnosti RESORBENT, s.r.o.* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/89711/LIG017_FMMI_N3922_6208T123_2011.pdf?sequence=1. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství.

56. *KrampeHarex®* [online]. Ostrovačice: KrampeHarex [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: <https://www.krampeharex.cz/>
57. SIDOROVÁ, S. *Celkový organický uhlík v monitorování mikrobiální biomasy* [online]. Brno, 2018 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/wmlv0/Bakalarska-prace-Sidorova.pdf>. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta.
58. ČSN EN IEC 62561-7 ED. 2. *Součásti systémů ochrany před bleskem (LPSC) - Část 7: Požadavky na směsi zlepšující uzemnění*. 2. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2018. Třídící znak: 357605.
59. *European Coatings* [online]. Hannover: Vincentz Network, 2021 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.european-coatings.com/>

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1 Skupina polovodičov v Mendelejevovej tabuľke [4]	17
Obrázok 2 Kontakty polovodičov typu P a N [4]	18
Obrázok 3 Vodič v elektrostatickom poli [1]	20
Obrázok 4 Polarizácia dielektrika [1]	20
Obrázok 5 Znázornenie úseku vodiča s konštantným prierezom pre odvodenie rovnice elektrického prúdu [1]	22
Obrázok 6 Schéma vhodného usporiadania pre odvodenie Ohmovho zákona [1]	22
Obrázok 7 Časový vektor sínusovo premennej veličiny [5]	23
Obrázok 8 Priebeh harmonických napätí a prúdov [1]	23
Obrázok 9 Schéma pre výpočet impedancie pre obvody RLC [2]	24
Obrázok 10 Vektor napätia a prúdu v obvode s indukčnosťou [2]	25
Obrázok 11 Vektor napätia a prúdu v obvode s kapacitou [2]	25
Obrázok 12 Schéma kremičitanov s ostrovčekovitou štruktúrou [6]	26
Obrázok 13 Sekané uhlíkové vlákna [18]	31
Obrázok 14 Snímka CNF z elektrónového mikroskopu [19]	32
Obrázok 15 Ukážka uhlíkových nanotrubičiek A) SWCNT B) DWCNT C) MWCNT [23]	33
Obrázok 16 Betón s obsahom oceľových vlákien [19]	33
Obrázok 17 Ukážka sadzí rôznej jemnosti [59]	34
Obrázok 18 Snímka GP z mikroskopu [19]	35
Obrázok 19 Schéma štruktúry grafitu [19]	35
Obrázok 20 Vonkajší graf: časová závislosť teplotného spádu medzi dvoma meranými bodmi pri rôznych obsahoch MWCNT v kompozite, vnútorný graf: závislosť súčiniteľa tepelnej vodivosti na množstve MWCNT [31]	37
Obrázok 21 SEM snímka z kompozitu použitého pre letiskovú dráhu a) zámes pripravená v laboratórnych podmienkach b) zámes pripravená in situ [32]	37
Obrázok 22 Snímka z termokamery zachytávajúca vyhrievané časti rampy [33]	38
Obrázok 23 Časť schémy postupu podľa ČSN EN 12457-2 [40]	46
Obrázok 24 Cement CEM I 42,5 R Mokrý [foto autora]	52
Obrázok 25 Vysokoteplotný popolček [51]	52
Obrázok 26 CEN normový piesok [foto autora]	54
Obrázok 27 Supragraphite C300 [52]	55
Obrázok 28 SEM snímka Supragraphite C300 [52]	55
Obrázok 29 Micrographite UC4 [52]	55
Obrázok 30 SEM snímka Micrographite UC4 [52]	55
Obrázok 31 Condufit C4 [52]	56

Obrázok 32 SEM snímka Condufit C4 [52]	56
Obrázok 33 Pyrolýzny koks [foto autora]	57
Obrázok 34 Petrolejový koks [foto autora]	58
Obrázok 35 Odpadný grafitový prach „filter mazačka“ 1 diel = 1 mm [52]	59
Obrázok 36 SEM snímka odpadný grafitový prach „filter mazačka“ [52]	59
Obrázok 37 Odpadný grafitový prach „vysávač“ 1 diel = 1 mm [52]	60
Obrázok 38 SEM snímka odpadný grafitový prach „vysávač“ [52]	60
Obrázok 39 Odpadné oceľové drôtky [foto autora]	61
Obrázok 40 Ukážka meracieho prípravku s elektródami vľavo, vpravo hore ukážka elektród a vpravo dole naplnený prvok pripravený na umiestnenie do lisu [52] [foto autora].....	63
Obrázok 41 Ukážka zaplnenia komory po ľahkom zhutnení dusadlom [foto autora]	63
Obrázok 42 Zaťaženie prípravku v lise [foto autora]	63
Obrázok 43 Skúšobné telesá s elektródami [foto autora].....	70
Obrázok 44 Meranie rezistancie (impedancie) telies [foto autora].....	71
Obrázok 45 Pripojenie vzoriek na zdroj jednosmerného prúdu pre meranie výhrevnosti [foto autora].....	72
Obrázok 46 Meranie teploty vzoriek termokamerou [foto autora].....	73
Obrázok 47 Záznam z termokamery pre receptúru REF [foto autora].....	77
Obrázok 48 Záznam z termokamery pre receptúru CON10 [foto autora]	77
Obrázok 49 Záznam z termokamery pre receptúru CON15 [foto autora]	78
Obrázok 50 Záznam z termokamery pre receptúru VYS10 [foto autora].....	78
Obrázok 51 Záznam z termokamery pre receptúru VYS15 [foto autora].....	79
Obrázok 52 Záznam z termokamery pre receptúru PEK10 [foto autora].....	79
Obrázok 53 Záznam z termokamery pre receptúru PEK15 [foto autora].....	79

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1 Chemické zloženie portlandského slínku [7]	29
Tabuľka 2 Tabelárne zhrnutie požadovaných parametrov a skúšobných metód pre návrh vodivého silikátového kompozitu pre vyhrievanie	50
Tabuľka 3 Technické parametre – CEM I 42,5 R Mokrý [49]	52
Tabuľka 4 Technické parametre – vysokoteplotný popolček [51].....	53
Tabuľka 5 Technické parametre – CEN piesok	54
Tabuľka 6 Technické parametre – Supragraphite C300 [52].....	55
Tabuľka 7 Technické parametre – Micrographite UC4 [52].....	56
Tabuľka 8 Technické parametre – Condufit C4 [52].....	56
Tabuľka 9 Technické parametre – pyrolýzny koks	57
Tabuľka 10 Technické parametre – petrolejový koks.....	58
Tabuľka 11 Technické parametre – „filter mazačka“ [52]	59
Tabuľka 12 Technické parametre – „vysávač“ [52]	60
Tabuľka 13 Technické parametre – „odpadné oceľové drôtky“	61
Tabuľka 14 Zloženie receptúry REF	67
Tabuľka 15 Zloženie receptúry CON10 s obsahom 10 % vodivej zložky	67
Tabuľka 16 Zloženie receptúry CON15 s obsahom 15 % vodivej zložky	67
Tabuľka 17 Zloženie receptúry VYS10 s obsahom 10 % vodivej zložky	68
Tabuľka 18 Zloženie receptúry VYS15 s obsahom 15 % vodivej zložky	68
Tabuľka 19 Zloženie receptúry PEK10 s obsahom 10 % vodivej zložky	69
Tabuľka 20 Zloženie receptúry PEK15 s obsahom 15 % vodivej zložky	69
Tabuľka 21 Namerané hodnoty impedancie prepočítané na rezistivitu po 7 dňoch	73
Tabuľka 22 Namerané hodnoty napätia a prúdu prepočítané na výkon v počiatočnom stave a po prípadnej zmene v čase 20 min	74
Tabuľka 23 Vypočítané hodnoty pevnosti v ťahu za ohybu a pevnosti v tlaku po 7 dňoch	75
Tabuľka 24 Vypočítané hodnoty objemovej hmotnosti po 7 dňoch	76

ZOZNAM GRAFOV

Graf 1 Granulometria – normový piesok	54
Graf 2 Granulometria – pyrolýzny koks.....	57
Graf 3 Granulometria – petrolejový koks	58
Graf 4 Granulometria – odpadný grafitový prach „filter mazačka“	59
Graf 5 Granulometria – odpadný grafitový prach „vysávač“	60
Graf 6 Grafické znázornenie priemernej nameranej impedancie vzoriek po 7 dňoch...	74
Graf 7 Grafické znázornenie priemernej vypočítanej rezistivity vzoriek po 7 dňoch	75
Graf 8 Grafické znázornenie priemerných vypočítaných hodnôt pevností a objemovej hmotnosti vzoriek po 7 dňoch	76